

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



**Evaluation und systematische Erfassung von Wärmepumpen-
Systemen in Fließgewässern**

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Bachelorthesis

von
Lukas Abel
aus Gießen

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 18.07.2018

Darmstadt, im Juli 2018

Lukas Abel
abel.lukas@gmx.de
Matrikelnummer:
Studiengang: B. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit zum Thema: **Evaluation und systematische Erfassung von Wärmepumpen-Systemen in Fließgewässern**
(Evaluation and systematic acquisition of heat pump systems in rivers and streams)

Korrigierte Fassung vom: 26.04.2019

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

Eingereicht: 18. Juli 2018

Ansprechperson: Steve Borchardt, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann
Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1. Einleitung	1
2. Funktionsweise Wärmepumpe	3
2.1 Allgemein	3
2.2 Wärmepumpen in Fließgewässern	8
Beschreibung der Systeme & Verfahren	8
Bauweisen	10
3. Rechtlicher Rahmen.....	14
3.1 Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)	14
3.2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	14
3.3 Oberflächengewässerverordnung (OGewV)	16
3.4 Weitere Gesetze/Verordnungen	16
4. Methodik	17
5. Aktive Anlagen in Deutschland	25
Lauterecken	25
Cunewalde.....	26
Fürth.....	28
Friedberg	29
Walting.....	30
Herrenhof (Gotha)	32
6. Zurückgebaute Anlagen in Deutschland	34
Esslingen	34
Bamberg	37
Erft / Bergheim-Zieverich	40
Wesseling	42

7. Schwachstellen	46
8. Potentiale	48
9. Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsweise der Wärmepumpe (Nguyen 2014, S. 2)	4
Abbildung 2: Energieflüsse bei einer Wärmepumpe (Paschotta 2010b, S. 1)	6
Abbildung 3: Kissenplattenwärmetauscher (Diadem 2017)	9
Abbildung 4: Anordnung des Wärmetauschers im maxloidverfahren (Loidl o. J.)	10
Abbildung 5: Wärmepumpen-Sammel- und -Einzelanlage (Scholt 1981, S. 180)	12
Abbildung 6: Verhältnis der Rückmeldungen WSA (eigene Darstellung)	17
Abbildung 7: Verhältnis der Rückmeldungen Wasserbehörden (eigene Darstellung)....	18
Abbildung 8: Ablauf der Untersuchung (eigene Darstellung)	19
Abbildung 9: Fragebogen an die zuständigen Behörden (eigene Darstellung)	21
Abbildung 10: Fragebogen Betreiber (eigene Darstellung)	24
Abbildung 11: Einbau des Fließwasserwärmetauschers (TGZ Bautzen o. J., S. 1)	26
Abbildung 12: Lage der Wärmepumpe Cunewalde (Hainke 2018 [E-Mail])	27
Abbildung 13: Wärmetauscherplatten in Friedberg (Schemer 2018 [E-Mail])	29
Abbildung 14: Lage der Mühle in Walting (Google Maps)	31
Abbildung 15: Verlegung der Kunststoffrohre Herrenhof (Platz 2018 [E-Mail])	32
Abbildung 16: Entwicklung der Neckartemperatur (Pflum 2017, S. 95)	35
Abbildung 17: Leistungszahl der Wärmepumpe (Rumpf 1977, S.59)	36
Abbildung 18: Kraftlaufschema Bamberg (St. Joseph-Stiftung Bamberg o. J., S. 10)	37
Abbildung 19: Verdampferbauwerk (St. Joseph-Stiftung Bamberg o. J., S. 9)	38
Abbildung 20: Erfttemperaturen (Frühling und Klein 1975, S. 268)	40
Abbildung 21: Arbeitszahl der Wärmepumpe (Wesseling) in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle (Broschk et al. 1983, S. 955)	44
Abbildung 22: Wärmepumpenanlagen in Deutschland (Quelle: Google Maps)	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Lauterecken (selbsterstellt, Daten: Dahlmanns 2018 [E-Mail]).....	25
Tabelle 2:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Cunewalde (selbsterstellt, Daten: Hainke 2018 [E-Mail])	27
Tabelle 3:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage Fürth (selbsterstellt, Daten: Schneider und Stöver 1983, S. 2–6)	28
Tabelle 4:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Friedberg (selbsterstellt, Daten: Schemer 2018 [E-Mail]).....	30
Tabelle 5:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Walting (selbsterstellt, Daten: Karg 2018 [E-Mail])	31
Tabelle 6:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Herrenhof (selbsterstellt, Daten: Platz 2018 [E-Mail])	33
Tabelle 7:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Esslingen (selbsterstellt, Daten: Boullion 1977, S. 382–384; Rumpf 1977, S. 62–65)	36
Tabelle 8:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Bamberg (selbsterstellt, Daten: Hamerak 1996, S. 44–53)	39
Tabelle 9:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Bergheim-Zieverich (selbsterstellt, Daten: Krammer 1982, S. 740–742)	41
Tabelle 10:	Monatliche Wärmelieferung, Stromverbrauch der Wärmepumpen-Heizzentrale im Zeitraum Juni 1982 bis Mai 1983 (verändert nach: Broschk et al. 1983, S. 959)	43
Tabelle 11:	Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Wesseling (selbsterstellt, Daten: Broschk et al. 1983, S. 954–957).....	44

Abkürzungsverzeichnis

COP	Leistungszahl Wärmepumpe (englisch)
EU	Europäische Union
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FKW	Fluorkohlenwasserstoff
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WKA	Wasserkraftanlage
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA	Wasserstraßen- & Schifffahrtsämter

1. Einleitung

Eine Wärmepumpe dient der „Erzeugung eines Wärmestroms auf relativ niedrigem Temperaturniveau, welcher groß genug ist, um die Wärmeverluste durch die Lüftung und die Außenwände des jeweiligen Gebäudes auszugleichen und damit die gewünschte Raumtemperatur aufrechtzuerhalten und/oder Warmwasser zu bereiten“ (Baumann et al. 2007, S. 9). Seit einigen Jahrzehnten etablieren sich Wärmepumpen im Wohnbereich, sie konnten im Jahr 2017 in Deutschland bei genehmigten Wohngebäuden einen Anteil von 43 % erreichen (Meyer 2018a, S. 1–2). Die Wärmequellen für Wohngebäude heutzutage sind zum Großteil der Boden und das Grundwasser. Allerdings wurden die ersten Wärmepumpen mit Umweltwärme aus Fließgewässern betrieben. Als Fließgewässer bezeichnet man „alle oberirdischen Binnengewässer mit – im Gegensatz zu stehenden Gewässern – ständig oder zeitweise fließendem Wasser wie Graben, Bach, Fluss, Strom und Kanal“ (Spektrum Verlag 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie sich die Nutzung von Wärmepumpensystemen in Fließgewässern mit der Zeit verändert hat und aus welchem Grund die Anlagen zurückgebaut oder möglicherweise nicht verwirklicht wurden.

Zunächst wird in Kapitel 2 auf die allgemeine Funktionsweise einer Wärmepumpe eingegangen, anschließend ergänzt durch die Beschreibung der Wärmepumpe in Fließgewässern. Um die Wärmepumpenanlagen miteinander in Vergleich setzen zu können, sind in dieser Arbeit zum Abschluss jeder Anlagenbeschreibung diverse Parameter aufgelistet. Welche Bedeutung diese kursiv gedruckten Parameter haben, wird in Kapitel 2 ebenfalls erläutert.

Anschließend wird der rechtliche Rahmen grob dargestellt. Obwohl dieser Teil in der Aufgabenstellung nicht explizit genannt wurde, soll dies der Vollständigkeit dienen. Da in Kapitel 7 unter anderem auf die Probleme der Wärmepumpen-Systeme eingegangen wird, sollen die rechtliche Grundlagen erläutert werden.

Ein Überblick über die Kontaktaufnahme mit den Behörden und Betreibern wird in Kapitel 4 geliefert. In diesem Kapitel wird primär darauf eingegangen mit welchen Behörden und Betreibern in Kontakt getreten wurde und wie hoch die Anzahl der Rückmeldungen war. Um von Betreibern sowie Behörden ausreichende und vergleichbare Informationen

zu erhalten, wurde ein Fragebogen angefertigt, auf diesen wird in dem Kapitel Methodik ebenfalls eingegangen.

Neben einer beispielhaften Auflistung der zurückgebauten Anlagen (Kapitel 6) soll ein Überblick der bestehenden Systeme vermittelt werden. Dabei werden auch die Erfahrungen der Betreiber, sowie zuständigen Behörden berücksichtigt. Durch den Kontakt mit den Wasser- und Schifffahrtsbehörden, sowie oberen und unteren Wasserbehörden ist es möglich geworden, einen Überblick der aktiven Wärmepumpensysteme in Fließgewässern innerhalb Deutschlands zu liefern. Aufgrund des Datenschutzes konnten nicht alle Behörden die notwendigen Informationen herausgeben. Auf Betreiberseite war deren Arbeitsaufwand zur Beantwortung der Fragen teilweise zu hoch. Aus diesen Gründen ist die Auflistung aktiver Anlagen (Kapitel 5) nicht vollständig.

In Kapitel 7 werden die Schwachstellen der Anlagen, die durch Internet- und Literaturrecherche, sowie der Korrespondenz mit Behörden und Betreibern aufgekommen sind, näher beleuchtet. Abschließend werden in Kapitel 8 die Möglichkeiten der Wärmepumpe in der Zukunft untersucht.

Im Rahmen der Veröffentlichung dieser Arbeit musste die Beschreibung der Anlagen Ismaning und Kleinseebach aus datenschutzrechtlichen Gründen herausgenommen werden. Außerdem wurde aus diesem Grund ebenfalls auf einen Anhang der ausgefüllten Fragebögen verzichtet.

2. Funktionsweise Wärmepumpe

2.1 Allgemein

Wärmepumpen kommen schon seit einigen Jahrzehnten auf verschiedenste Arten zum Einsatz. Diese beruhen auf dem Prinzip von Carnot, welches die Umwandlung von Arbeit in Wärme thematisiert. Mit der Umkehrung des Carnot'schen Kreisprozess, sowie durch die Hauptsätze der Thermodynamik¹, ausgearbeitet Mitte des 19. Jahrhunderts, wurde ein Grundstein für die Nutzung von Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen gelegt. (Zogg 2010, S. 8)

Ansporn für die Überlegungen war in dieser Zeit nicht die Erzeugung von Wärme, sondern von Kälte. Um Lebensmittel über einen längeren Zeitraum haltbar zu machen, mussten Lösungen gefunden werden. 1834 wurde daher die erste Dampfkomppressionsmaschine zur Eiserzeugung hergestellt. In den kommenden Jahrzehnten wurden die Anlagen weiterentwickelt, verschiedene Kältemittel getestet und verbesserte Kompressorarten verbaut. Die ersten Wärmepumpen für die Raumheizung oder Warmwasseraufbereitung wurden in den 1930er Jahren in Betrieb genommen. Sie nutzten Wärmequellen wie See- wasser, Flusswasser, Grundwasser oder Abwärme. (Zogg 2010, S. 11–12)

Auch wenn die Anlagen unterschiedliche Wärmequellen nutzten ist das damalige Prinzip mit dem heutigen identisch (siehe Abbildung 1): Die Umweltwärme wird am Verdampfer auf ein *Kältemittel* übertragen, das durch die eigene geringe Siedetemperatur verdampft. Durch den, meist elektrisch betriebenen Verdichter wird das verdampfte Kältemittel unter einen höheren Druck gesetzt und dadurch weiter erwärmt. Am Verflüssiger gibt das heiße gasförmige Kältemittel seine Wärme ab und kondensiert. Das Kältemittel wird anschließend zu einer Drossel (Expansionsventil) geleitet. Hierdurch wird der Druck auf das Kältemittel verringert, die Temperatur sinkt und somit kann das Kältemittel im Kreislauf weiter genutzt werden.

¹ Hauptsätze der Thermodynamik (Schaerer 2004, S. 1–4)

1. Hauptsatz: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern immer nur in andere Energiearten umgewandelt werden
2. Hauptsatz: Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar. Wärme kann niemals von selbst von einem Körper niedriger Temperatur zu einem Körper höherer Temperatur übergehen.

Die Wärme, die am Verflüssiger abgegeben wurde, kann anschließend auf ein Wärmeverteilssystem übertragen und somit als Raumheizung oder Warmwasseraufbereitung genutzt werden.

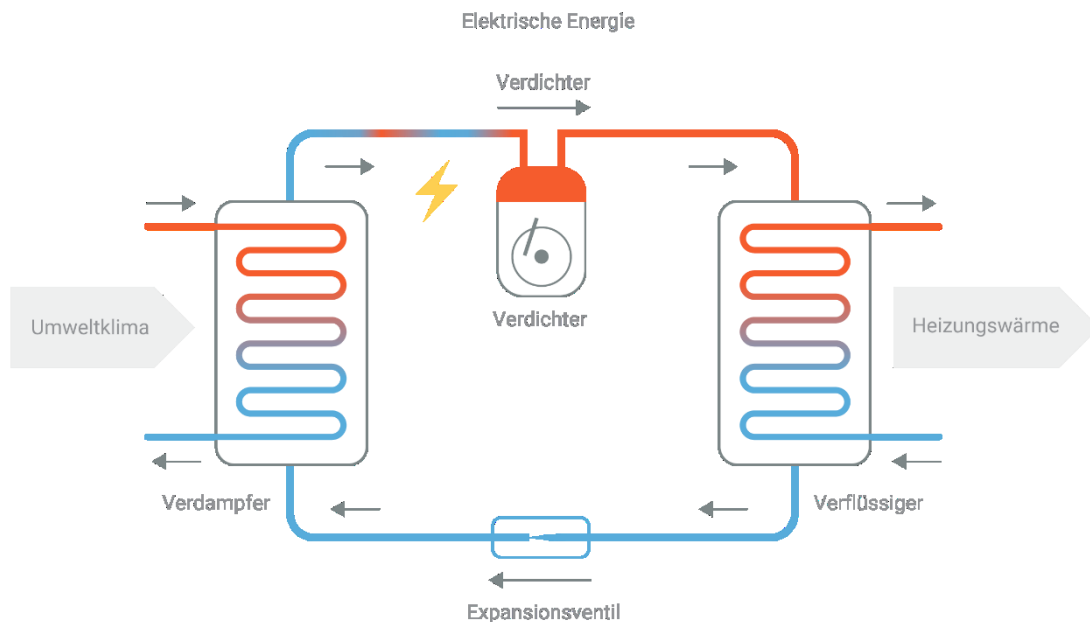


Abbildung 1: Funktionsweise der Wärmepumpe (Nguyen 2014, S. 2)

Heutzutage werden Wärmepumpen bevorzugt mit Wärmequellen aus Luft, Erde oder Grundwasser betrieben. Eine Nutzung von Fließwasserwärme als Wärmequelle wird in Kapitel 2.2 vorgestellt.

Im Laufe der Zeit haben sich Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) als geeignetes Kältemittel bewiesen. Neben den guten thermodynamischen Eigenschaften, halten FKW die erforderlichen Sicherheits- und Umweltschutzvorschriften ein. Allerdings soll der Einsatz von FKW, aufgrund der Unterstützung des Treibhauseffektes, weiter reduziert und die Kältemittel durch natürliche Alternativen wie Ammoniak oder CO_2 ersetzt werden. Bis in die 90er Jahre wurden die sogenannten Fluorchlorkohlenwasserstoffe genutzt, allerdings aufgrund ihrer schädigenden Wirkung auf die Ozonschicht verboten. Die in Kapitel 5 häufig thematisierten Kältemittel R12 & R22 gehören ebenfalls zu den FCKWs und wurden 1987 bzw. 2000 verboten. (Baumann et al. 2007, S. 24–25)

Kältemittel bei Wärmepumpen in Fließgewässern müssen vor allem drei Kriterien erfüllen. Zum einen soll das Kältemittel bei möglichst niedrigen Temperaturen verdampfen,

um so die Anlage möglichst effizient gestalten zu können. Zum anderen darf das Kältemittel bei sehr niedrigen Temperaturen nicht gefrieren. Dabei darf das Kältemittel auch keine schädlichen Eigenschaften aufweisen, die dem Flusswasser bzw. der Umwelt schaden könnten.

Zur Beschreibung der Wirkung von Wärmepumpen sind verschiedene Kenndaten von Bedeutung.

Unter *Heizwärmeleistung* bzw. *Kälteleistung* ist die Leistung zu verstehen, die das System, selbst am kältesten Tag des Jahres, maximal zu leisten im Stande ist. Die Heizwärmeleistung wird in Kilowatt (kW) angegeben.

Die Energie eines Systems besteht aus den Teilen Anergie und Exergie. Während die Exergie den Teil eines Systems beschreibt, der Arbeit verrichten kann, ist unter Anergie der Teil zu verstehen, dem es nicht möglich ist, Arbeit zu leisten. In Bezug auf die beschriebene Wärmepumpe ist das Flusswasser als eine Quelle von Anergie anzusehen. Da die Anergie keine Arbeit verrichten kann, muss dem System elektrische Energie (Exergie) zugeführt werden, um dem System die Wärme zu entziehen.

Am Verdichter einer Wärmepumpe muss Energie aufgewandt werden. Ein Großteil der Wärmepumpen wird elektrisch oder durch einen Verbrennungsmotor betrieben. Die *Leistungszahl* (ϵ / engl.: COP) beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Leistung und (elektrisch) aufgewandeter Leistung (siehe Abbildung 2). Eine hohe Leistungszahl beschreibt dementsprechend, dass die Wärmepumpe mit geringer elektrischer Leistung, eine hohe Heizwärmeleistung erreichen kann. Da am Verdichter aufgrund veränderlicher Quell- sowie Vorlauftemperaturen keine konstante Leistung aufgewendet wird, handelt es sich bei dem COP lediglich um eine Momentaufnahme und dieser sollte daraus folgend, falls möglich, immer bei vergleichbaren Temperaturen ermittelt werden. (Paschotta 2010a, S. 1–4)

$$COP = \frac{P_W}{P_{EI}} [-]$$

P_W = abgegebene Wärmeleistung [kW]

P_{EI} = aufgenommene Antriebsleistung (meist elektrisch) [kW]

COP = Leistungszahl [-]

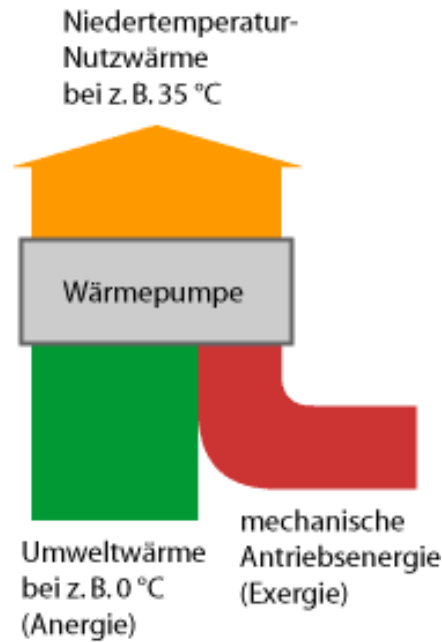


Abbildung 2: Energieflüsse bei einer Wärmepumpe (Paschotta 2010b, S. 1)

Die *Jahresarbeitszahl* (JAZ) ist eine Möglichkeit die Leistung des Systems über einen Zeitraum eines Jahres zu beschreiben. Dabei wird das Verhältnis zwischen erzeugter thermischer Energie zur aufgewendeten Energie beschrieben. Allerdings sind bei der aufgewendeten Energie auch Nebenantriebe (z.B. Ventilatoren oder Grundwasserpumpen) mit zu berücksichtigen. (Doelling 2016, S. 2)

Dementsprechend lässt sich festhalten, je niedriger die Vorlauftemperatur und je höher die Quelltemperatur, umso höher ist die Jahresarbeitszahl.

$$JAZ = \frac{Q_{Nutz}}{E_a} [-]$$

Q_{Nutz} = abgegebene Wärmemenge [kWa]

E_a = aufgenommene Energie [kWa]

JAZ = Jahresarbeitszahl [-]

Die *Quelltemperatur* beschreibt die Temperatur der genutzten Umweltwärme. Um Wärmepumpen möglichst effizient zu gestalten, sollte die *Vorlauftemperatur* (Temperatur des Kühlmittels bei Wärmeaufnahme) möglichst gering sein. (Paschotta 2010a, S. 1)

Bei zu hohen Vorlauftemperaturen verrichtet der Verdichter zusätzliche Arbeit und verbraucht dabei mehr Strom. In Relation sinkt der Stromverbrauch bei Reduzierung der Vorlauftemperatur pro 1 K um durchschnittlich 2,5 %. Fußboden- und Wandheizungen zeichnen sich durch eine niedrige Vorlauftemperatur (ca. 40° C, vgl. Heizkörper: 70° C) aus und eignen sich deshalb sehr gut in Kombination mit einer Wärmepumpe. Die Verringerung der Vorlauftemperaturen kann unter anderem durch eine geeignete Außen- und Innendämmung oder der Reduzierung von Lüftungsverlusten erreicht werden. Bei sehr hohen Vorlauftemperaturen ist es oftmals zweckmäßig das System bivalent (s.u.) zu betreiben. (Energie Experten 2018, S. 1–4)

Wärmepumpenanlagen können vor allem durch ihre *Betriebsweise* differenziert werden. Eine *monovalent* betriebene Anlage deckt die gesamte Wärmezeugung. Dementsprechend ist die Auslegungsheizleistung mit der maximalen Heizleistung zur Wärmeversorgung des Gebäudes gleichzusetzen (vgl. Baumann et al. 2007, S.57). Diese Betriebsweise lohnt sich gerade dann, wenn die Vorlauftemperatur unter 55°C liegt.

Bei einer *bivalenten* Anlage ist neben der Wärmepumpenanlage ein weiterer Wärmezeuger (Öl- oder Gaskessel) parallel geschaltet. Dieser soll dazu dienen, die Wärmepumpenanlage bei Verbrauchsspitzen zu unterstützen (Baumann et al. 2007, S. 58). Außerdem schützen die bivalenten Anlagen das System, durch die Unterstützung der Kessel, vor frostbedingten Ausfällen.

Die *monoenergetische* Betriebsweise ist dem Prinzip der bivalenten Anlage identisch. Allerdings wird die Wärmepumpenanlage hier mit einer Elektroheizung zur Unterstützung kombiniert. Die Steuerung der Anlage kann so erfolgen, dass die Wärmepumpe mehr als 95% der Jahresheizwärmeversorgung übernimmt. (Baumann et al. 2007, S. 61)

2.2 Wärmepumpen in Fließgewässern

Die erste Wärmepumpe in einem Fließgewässer wurde Mitte des 20. Jahrhunderts in Betrieb genommen. Seitdem hat sich die Wärmepumpentechnologie weiterentwickelt. Mittlerweile gibt es diverse Bauweisen und Verfahren, um dem Fließgewässer Wärme zu entziehen. Anfangs wurde die gewonnene thermische Energie lediglich dazu genutzt, einzelne Gebäude oder Hallenbäder mit Wärme zu versorgen. Im Laufe der Zeit war es möglich kleinen Wohnvierteln die nötige Wärmeenergie zu liefern.

In der Schweiz kommen Wärmepumpen schon seit einigen Jahrzehnten zum Einsatz. Ein bekanntes Beispiel liefert die 1938 erbaute erste Wärmepumpenanlage im Züricher Rathaus. Die Wärmeenergie wurde aus dem Fluss Limmat entnommen und damit das Kühlen sowie Heizen der Räume übernommen. Mit der Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträgermittel sowie der Temperatur der Limmat konnte die Anlage knapp 192 kW Heizleistung liefern. (Rumpf 1977, S. 59)

Bei der dort eingesetzten Wärmepumpe handelte es sich um eine Kaltdampfmaschine mit Rotationskolbenkompressor und dem Wärmeträgermittel Dichlordifluormethan, auch Freon genannt (Egli 1944, S. 87). 2001 wurde die Wärmepumpe gegen ein effizienteres Modell ausgetauscht (Zogg 2010, S. 27).

Beschreibung der Systeme & Verfahren

Die thermische Nutzung von Fließgewässern lässt sich übergeordnet in zwei unterschiedliche Systeme einteilen. Das *offene System* zeichnet sich durch eine aktive Fließwasserentnahme aus, dem durch einen Verdampfer die Wärme entzogen und anschließend in das Gewässer zurückgeleitet wird. Im *geschlossenen System* wird die Wärme aus dem Fließgewässer direkt, mittels Wärmetauscher, gewonnen. Anschließend wird unabhängig von den Systemen die Umweltwärme, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, auf den Heizkreislauf übertragen.

Außerdem lassen sich die Systeme mit differenzierenden *Verfahren* installieren. Das offene System bietet zwei bekannte Verfahren zur thermischen Nutzung des Fließgewässers. Zum einen wird der Wasserstrom durch ein Becken geleitet, in dem Plattenwärmetauscher dem Wasser die Wärme entziehen. Zum anderen kann das entnommene Fließgewässer direkt einem Rohrbündelverdampfer zugeführt werden. (Rumpf 1980, S. 229)

Das geschlossene System bietet durch die Variationen der Wärmetauscher eine Vielzahl von Verfahren. Das sogenannte WEA-System wurde ursprünglich genutzt, um Wärme aus Abwässern zu gewinnen. Dabei werden Wärmetauscherplatten in einer Rinne installiert und somit die Wärme entzogen (Fachzentrum Wärme aus Abwasser 2009). Dieses Verfahren wird analog in der Anlage Cunewalde (siehe Kapitel 5) für den Wärmeentzug aus Fließgewässern genutzt.

Eine weitere Möglichkeit, die Wärme direkt im Fließgewässer zu entziehen, bietet der Kissenplatten-Wärmetauscher. Im Gegensatz zum Rohrschlangen-Wärmetauscher können die Kissenplatten in Strömungsrichtung eingebaut werden und dadurch einen höheren Wärmeübergang erreichen. Durch die Form des Wärmetauschers (siehe Abbildung 3) sind nur geringe hydraulische Verluste zu beobachten. Außerdem ist durch die Anordnung die Anfälligkeit für Verschmutzung, sowie der Reinigungsaufwand erheblich verringert (vgl. Widmer 2014, S.25). Bisher wurde diese Variante lediglich zur Kühlung der Wasserkraftgeneratoren und der damit verbundenen Optimierung eines Wasserkraftwerks getestet. Allerdings war bereits nach dreimonatigem Einsatz am Wärmetauscher ein Biofilm zu erkennen. Auf dieses und weitere Probleme bei dem Einsatz von Wärmetauschern wird in Kapitel 7 näher eingegangen.

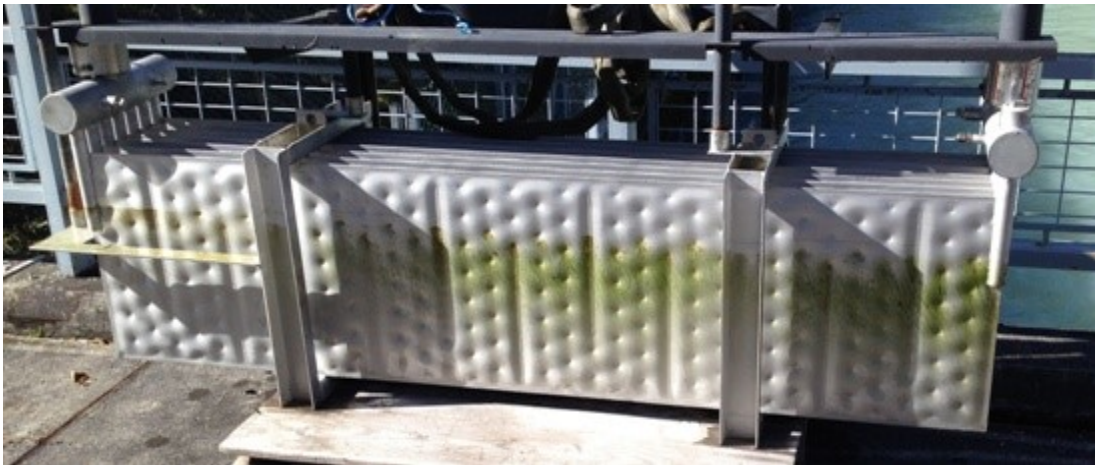


Abbildung 3: Testwärmetauscher (Kissenplattenwärmetauscher) nach dreimonatigem Einsatz im Unterwasserkanal eines Kraftwerks (Diadem 2017)

Eine weitere Bauweise, die den Wärmetauscher insbesondere vor Treibgut schützen soll, ist das maxloidlverfahren. Abbildung 4 zeigt, dass die Wasserströmung den Wärmetauscher umfließt und so die Wärme an diesen abgibt. Das im Wärmetauscher vorhandene Wärmeträgermedium fließt zu einem Verdampfer und kann dort die Wärme abgeben. Die Platten des Wärmetauschers sind parallel zur Fließrichtung angeordnet und haben aus diesem Grund keinen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse des Fließgewässers. Deshalb ist, ähnlich wie bei den bereits angesprochenen Kissenplatten-Wärmetauschern, auch eine Kombination mit einem Wasserkraftwerk möglich. Im Vergleich zu den Kissenplatten-Wärmetauschern, die lediglich zur Kühlung von Generatoren genutzt werden, wird bei diesem Verfahren Wärme für beispielsweise Wohnanlagen erzeugt.

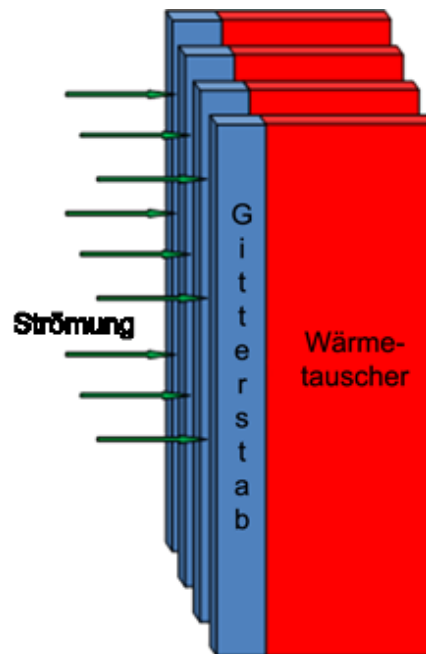


Abbildung 4: Anordnung des Wärmetauschers im maxloidlverfahren (Loidl o. J.)

Bauweisen

Das besondere an Wärmepumpensystemen in Fließgewässern ist, dass diese sehr stark an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden können/müssen. Flusswassertemperatur, Qualität des Gewässers oder ob es sich um eine mono- oder bivalente/monoenergetische Betriebsweise handelt, sind entscheidend für die Art des Systems. Des Weiteren hängt von dieser Wahl die *Bauweise* des Wärmepumpensystems ab. Im Folgenden wird auf vier der möglichen Bauweisen eingegangen.

- I. Eine sehr häufig genutzte Bauweise der Wärmepumpensysteme in Fließgewässern ist die direkte Entnahme aus einem Teilstrom des Wassers. Dieses offene System wurde vor allem in den Anfängen der Wärmepumpe verwendet. Nach der Entnahme wird das Flusswasser zur Wärmepumpe gefördert, wo die nutzbare Wärme entzogen wird. Anschließend wird das Wasser wieder abgekühlt in das Gewässer zurückgegeben. Um das Wasser zum Wärmeentzug zu nutzen, genügt eine Wasserqualität im durchschnittlichen Bereich (mäßige Verunreinigung). Durch die vergleichsweise einfache Konstruktion sind die Investitionskosten bei dieser Bauweise gering. Allerdings kann das aggressive Flusswasser den Verdampfer beschädigen. Des Weiteren ist es möglich, dass dieser bei sehr geringen Temperaturen vereist und die Anlage somit nicht nutzbar wäre. (Scholt 1981, S. 178)
Bei dieser Variante ist durch den Eingriff in den Flusslauf eine Vielzahl von Gesetzen zu beachten, die eine Errichtung einer solchen Anlage erschweren und ggf. im Betrieb einschränken (siehe Kapitel 3).
- II. Ein Wärmeentzug direkt im Fließgewässer ist durch den Wärmetauscher möglich. Dieser ist fest im Flussbett installiert und kann die Wärme aus dem vorbeiströmenden Flusswasser auf ein, im Wärmetauscher zirkulierendes Wärmeträgermedium, übertragen. Anschließend wird die Wärme über den Verdampfer der Wärmepumpe auf das Kältemittel des Wärmepumpenkreislaufs weitergegeben. Diese Variante bietet sich bei Fließgewässern schlechterer Qualität (hohe Konzentration von Schwebstoffen und gelösten Verbindungen) an, weil der Verdampfer hier durch den vorgeschalteten Wärmetauscher nicht in direkten Kontakt mit dem aggressiven Flusswasser kommt. Außerdem ist bei Verwendung eines frostgeschützten Wärmeträgermediums die Vereisung des Verdampfers ausgeschlossen. Allerdings ist es notwendig Maßnahmen zu treffen, um den Wärmetauscher vor Treibgut zu schützen. Diese Art der Anlagen wird aus den aufgeführten Gründen häufig als Einzelanlage (siehe Abbildung 5) genutzt. (Scholt 1981, S. 178–180)
- III. Damit ein Wärmetauscher auch als Sammelanlage effektiv nutzbar wird, ist es notwendig die Anlage vor mechanischen Belastungen und Treibgut zu schützen. Wenn möglich werden dafür die Wärmetauscher in einem eigens angelegten Kanal verbaut (siehe Abbildung 5). Dort können Filter leicht eingebaut, sowie die mechanischen Belastungen reguliert werden. Allerdings ist hier darauf zu achten,

dass der Stromverbrauch für die Pumpen, die das Wärmeträgermedium zu den Wohnhäusern pumpen, nicht zu hoch wird. (Scholt 1981, S. 180–182)

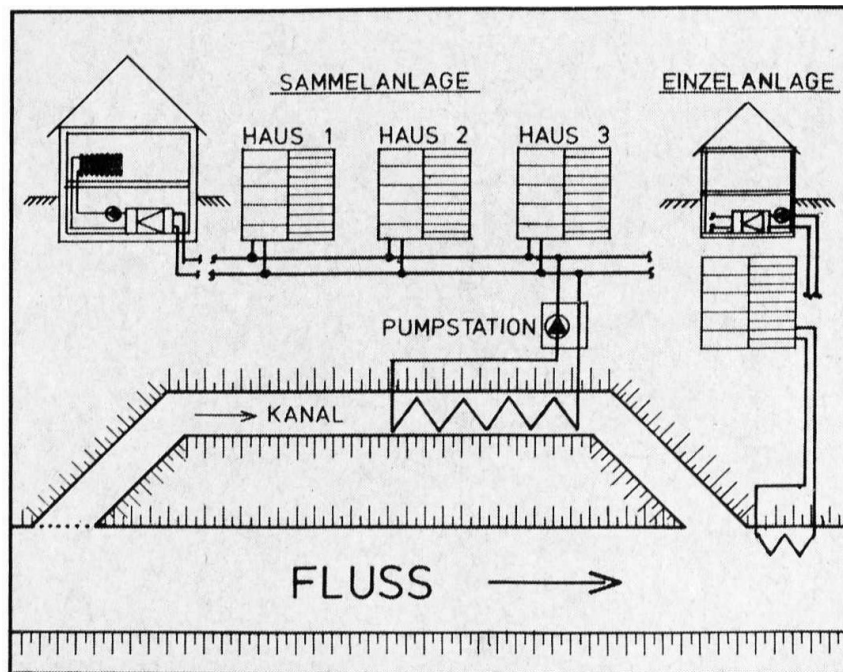


Abbildung 5: Wärmepumpen-Sammel- und -Einzelanlage (Scholt 1981, S. 180)

IV. Eine seltener eingesetzte Variante ist die der Uferfiltration. Sie soll hier nur am Rande genannt werden, da sich die thermische Nutzung nicht auf das Fließgewässer beschränkt, sondern ebenfalls das Grundwasser als Wärmequelle nutzt.

Das zum Teil versickerte Flusswasser fließt hier gemeinsam mit dem Grundwasser auf einen, neben dem Fließgewässer installierten, Brunnen zu. Dort kann das Wasser durch eine Pumpe gefördert und anschließend dem Verdampfer zugeführt werden (offenes System). Durch die kurze Bodenpassage wird das Flusswasser von Schwebstoffen gereinigt. Der Verdampfer wird dadurch geschützt. Allerdings ist diese Art von Brunnen stark anfällig für Verockerung (Ablagerung von Eisen- und Manganoxiden). (LAWA 1980, S. 18)

Mit Hilfe eines Plattenverdampfers ist es auch möglich die Wärmeenergie des versickerten Wassers direkt (geschlossenes System) zu nutzen. (Rumpf 1980, S. 229)

Im Allgemeinen sind die Nutzungsmöglichkeiten von Wärmepumpen-Systemen in Fließgewässern abhängig vom Jahrestemperaturverlauf des Gewässers (Beispiel: Neckar, siehe Kapitel 6). Besonders die Wahl, ob eine monovalente, bivalente oder monoenergetische Betriebsweise genutzt werden soll, ist von diesen Randbedingungen abhängig. Aufgrund von möglichen Vereisungen innerhalb des Systems wurde in der Vergangenheit häufig die bivalente Betriebsweise bevorzugt. Die Wahl zwischen einem offenen oder geschlossenen System wird vor allem durch genehmigungsrechtliche Fragen (Kapitel 3), dem Heizbedarf, sowie dem Platzbedarf, der bei dem offenen System deutlich höher ist, beeinflusst. Auch die Wasserqualität spielt bei einem offenen System eine entscheidende Rolle, da das Flusswasser dem Verdampfer direkt zugeführt wird. Durch Schwebstoffe oder Störkörper kann der Verdampfer geschädigt werden.

Die Wärmeenergie, die ein Fließgewässer für die Nutzung zur Verfügung stellen kann, wird stark von der Fließwassertemperatur beeinflusst. Da eine thermische Nutzung gerade in den Wintermonaten von Bedeutung ist, wird im weiteren Verlauf der Arbeit auch von der *durchschnittlichen Fließwassertemperatur im Winter* gesprochen. Neben der Durchschnittstemperatur muss bei der Betrachtung des Fließgewässers allerdings, wie bereits angedeutet, auch auf die minimalen Temperaturen geachtet werden.

Wie stark ein Fließgewässer abgekühlt werden darf, ist nicht einheitlich geregelt (siehe Kapitel 3). Denn die Belastungen durch eine *Abkühlung* hängen unter anderem von der *Fließgeschwindigkeit*, der *Abflussmenge*, sowie der *Entnahmemenge*, die gleichzeitig der Einleitmenge entsprechen muss, ab.

3. Rechtlicher Rahmen

3.1 Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Die Wasserrahmenrichtlinie regelt seit dem Jahr 2000 die Wasser-Politik der Europäischen Union. Die Richtlinie gilt für alle Mitgliedsstaaten der EU und hat unter anderem das Ziel oberirdische Gewässer in einen “guten ökologischen und chemischen Zustand” (BMNT 2011) zu bringen. Da die Probleme in den Gewässern innerhalb der EU sehr stark variieren, ist es Aufgabe der Mitgliedsstaaten die Richtlinie umzusetzen. In Deutschland wurden die Vorgaben in das Wasserhaushaltsgesetz (siehe 3.2) integriert und werden seitdem durch die Bundesländer umgesetzt. Seit 2011 werden Teile der Wasserrahmenrichtlinie auch in der Oberflächengewässerverordnung (siehe 3.3) thematisiert.

Die Wasserrahmenrichtlinie soll dementsprechend u. a. dafür sorgen die Oberflächengewässer in einen möglichst naturnahen Zustand zu führen. Der ökologische Zustand der Oberflächengewässer wird über die Zeit bewertet und “über differenzierte biologische (vorrangig), hydromorphologische (unterstützend) sowie chemische und chemisch-physikalische (unterstützend)” (HMUKLV 2015) Parameter beschrieben.

3.2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das Wasserhaushaltsgesetz ist entscheidend für den Schutz von ober- und unterirdischen Gewässern. Durch eine “nachhaltige Gewässerbewirtschaftung” soll das Gewässer “als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut” (§ 1 WHG) geschützt werden.

Deshalb ist jede Person verpflichtet “eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften zu vermeiden” (§ 5 Abs. 1 S. 1 WHG). Ob eine solche Veränderung in Bezug auf die Installation von Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern vorliegt, ist im Einzelfall von den Behörden zu prüfen. § 8 bis 10 stellen ebenfalls eine Grundlage zur Prüfung dar, ob es sich um eine Wasserentnahme handelt und ob für die Anlage eine Genehmigung benötigt wird. Dabei werden in § 9 verschiedene Nutzungsarten vorgestellt.

Für die Wärmepumpen in Fließgewässern sind vor allem folgende Benutzungen von Bedeutung und zu prüfen:

“das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern”

“das Aufstauen und Absenken von oberirdischen Gewässern”

“das Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer”

(§ 9 (1) 1. 2. 4. WHG)

Wird das Fließgewässer durch einen Wärmetauscher (geschlossenes System) weder aufgestaut noch abgesenkt und besitzt ein wasserungefährliches Wärmeträgermedium, so stellt das geschlossene System keine Benutzung nach § 9 dar. Dementsprechend ist eine Genehmigung von geschlossenen Systemen mit weniger Aufwand verbunden, als offene Systeme.

Bei der Prüfung, ob durch die Anlage ein Aufstau oder Absenk des Fließgewässers stattfinden würde, ist die Mindestwasserführung (§ 33) zu beachten. Ein Gewässer muss eine ausreichende Abflussmenge aufweisen, um die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie (§ 27-31) zu erreichen. Dementsprechend muss in einem offenen System die entnommene Wassermenge, anschließend wieder in das Gewässer gegeben werden.

Die Wasserrahmenrichtlinie wird im Wasserhaushaltsgesetz besonders in § 27 – 31 umgesetzt. Demnach sollen oberirdische Gewässer so bewirtschaftet werden, dass “eine Verschlechterung ihres ökologischen und chemischen Zustands vermieden wird” (§ 27 Abs.1 S. 1).

Die Bewilligung einer Anlage wird laut § 14 Abs. 2 lediglich unter Einhaltung einer Frist durchgeführt. In Korrespondenz mit den Behörden liegen die, in der Praxis eingesetzten Fristen zwischen 10 bis 30 Jahren.

Allerdings können die Regelungen der Bundesländer von denen des Wasserhaushaltsgesetzes abweichen.

3.3 Oberflächengewässerverordnung (OGewV)

Die Oberflächengewässerverordnung konzentriert sich auf die Bewertung von Oberflächengewässern gemäß der WRRL. Dafür sind in der OGewV Grenzwerte festgelegt, die es möglich machen, Oberflächengewässer in Kategorien aufzuteilen und anhand des ökologischen (§ 5) sowie chemischen (§ 6) Zustands zu kategorisieren. Die zuständige Behörde muss nach § 10, die in Anlage 10 OGewV festgelegten Parameter in regelmäßigen Abständen überprüfen, um Veränderungen im Gewässer wahrzunehmen und um ggf. eine Verschlechterung des Gewässerzustandes zu vermeiden. Die Gewässer werden in der OGewV in fünf Zustände eingeteilt: sehr gut, gut, mäßig, unbefriedigend, schlecht. Dabei werden u.a. biologische, hydromorphologische und physikalisch-chemische Qualitätskomponenten betrachtet (OGewV Anlage 4).

In Bezug auf Wärmepumpen in Fließgewässern sind hier besonders die Änderungen der Fließwassertemperatur relevant. Das Fließgewässer darf durch den Wärmeentzug keinen schlechteren ökologischen Zustand erreichen. Grenzwerte, bezugnehmend auf die Temperatur, sind in der Oberflächengewässerverordnung in Anlage 7 festgelegt.

3.4 Weitere Gesetze/Verordnungen

Neben dem Wasserhaushaltsgesetz und der Oberflächengewässerverordnung sind für den Betrieb von Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern weitere Gesetze und Verordnungen von Bedeutung.

Handelt es sich bei dem Fließgewässer um eine Bundeswasserstraße (z.B. Rhein), dann muss eine strom- und schifffahrtspolizeiliche Genehmigung nach § 31 Bundeswasserstraßengesetz vorliegen. Dabei muss die entnommene Wassermenge angegeben werden, damit eine Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs auszuschließen ist. (Jacob 2018 [E-Mail])

Die Fischgewässerverordnung regelt für jedes Bundesland bestimmte Anforderungen, die notwendig sind, um das Leben von Fischen zu erhalten. Außerdem wird festgehalten, welche Voraussetzungen für die Benutzung der Gewässer erfüllt werden müssen. Dementsprechend muss eine Wärmepumpenanlage in einem Fließgewässer auch im Hinblick auf die Fischgewässerverordnung überprüft werden.

4. Methodik

Um eine Auflistung der Anlagen in Deutschland, sowie Erfahrungsberichte von Betreibern in diese Arbeit mit einfließen zu lassen, war es notwendig die zuständigen Behörden zu kontaktieren. Da der Zuständigkeitsbereich für Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern deutschlandweit nicht einheitlich geregelt ist, wurden im Zuge der Untersuchung sowohl die Wasser- und Schifffahrtsämter, als auch die oberen und unteren Wasserbehörden kontaktiert.

Im Rahmen dieser Thesis wurden zu Beginn der Untersuchung per E-Mail Kontakt zu den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern aufgenommen. Die 39 zuständigen Ämter sind hauptsächlich für Belange der Schifffahrt zuständig. Dabei fallen unter anderem Unterhaltung und Betrieb der Bundeswasserstraßen, Wasserstands-Meldungen sowie die Förderung des Binnenschiffsverkehrs in ihren Aufgabenbereich. Den Ämtern liegen zwar Daten über Ein- bzw. Ausleitungen am Fließgewässer vor, allerdings ist der Grund für die Wasser- und Schifffahrtsämter irrelevant. Dementsprechend konnten die Wasser- und Schifffahrtsämter nur vereinzelt zu der Untersuchung beitragen. Dennoch konnte eine Rücklaufquote von ca. 64 % erreicht werden (siehe Abbildung 6).

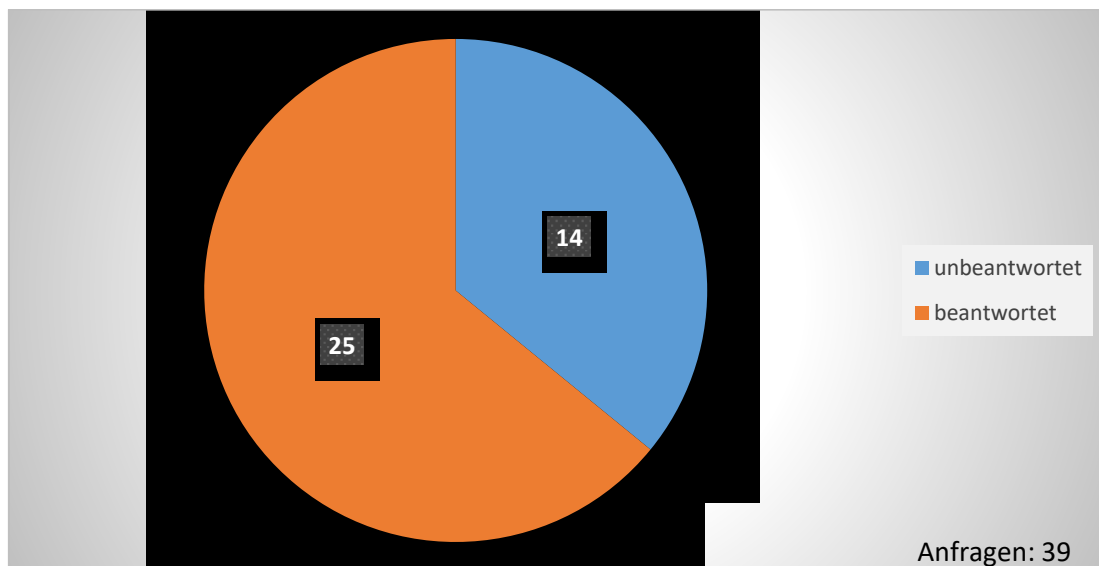


Abbildung 6: Verhältnis der Rückmeldungen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (eigene Darstellung)

Aus den oben genannten Gründen wurden daraufhin weitergehend die oberen bzw. unteren Wasserbehörden kontaktiert. Da die Zuständigkeit bezüglich Wärmepumpenanlagen in den Bundesländern nicht einheitlich geregelt ist, wurden beide Behörden eingebunden. Insgesamt sind circa 350 Anfragen per E-Mail versandt worden (siehe Abbildung 7). Die hohe Zahl liegt auch darin begründet, dass einige der zuständigen Mitarbeiter vorübergehend nicht erreichbar waren und dementsprechend Kontakt zu einem Kollegen vermittelt wurde. Die Rückmeldungen von 64 Antworten waren vergleichsweise gering, da im Laufe der Untersuchung teilweise die oberen Wasserbehörden, für die in ihrem Zuständigkeitsbereich liegenden unteren Wasserbehörden, die Anfrage beantwortet haben. Außerdem wurde beispielsweise im Bundesland Hessen die Anfrage direkt vom Hessischem Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz bearbeitet. Vereinzelt wurde nach der Anfrage bei den zuständigen Behörden direkt der Kontakt mit den Betreibern hergestellt.

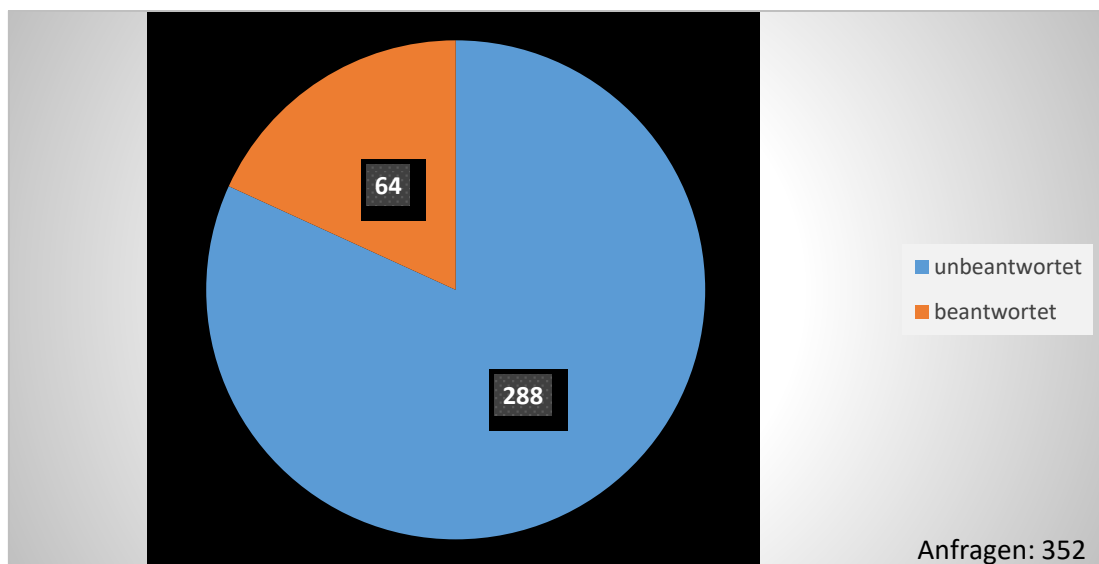


Abbildung 7: Verhältnis der Rückmeldungen obere und untere Wasserbehörden (eigene Darstellung)

Das Procedere der Untersuchung ist grafisch in Abbildung 8 dargestellt. Nachdem die Wasserbehörden kontaktiert und der passende Fragebogen (Abbildung 9) versandt wurde, konnten die beantworteten Rückmeldungen ausgewertet und ggf. die Betreiber kontaktiert werden. Leider war es aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht immer möglich mit dem Betreiber in Kontakt zu treten. Darauf wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Für den Fall, dass die Kontaktdaten des Betreibers vorlagen, wurde sich mit diesem in Verbindung gesetzt und der Fragebogen (Abbildung 10) zur Vervollständigung zugeleitet.

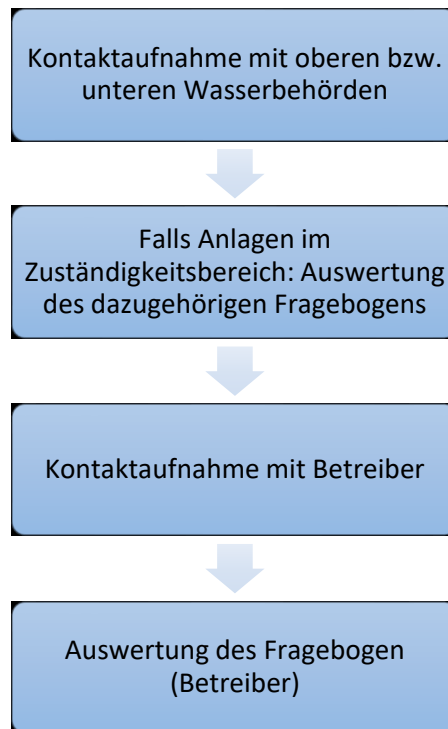


Abbildung 8: Ablauf der Untersuchung (eigene Darstellung)

Mit Hilfe der Angaben von Behörden und Betreiber war es möglich einige Anlagen relativ detailliert zu beschreiben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dargestellt. Durch die Kontaktaufnahme zu Behörden und Betreibern konnten wertvolle Erfahrungswerte beider Parteien in die Untersuchung mit einfließen. Positive als auch negative Erfahrungen in Planung oder Betrieb einer Wärmepumpenanlage im Fließgewässer sind in Kapitel 7 bzw. 8 dargestellt.

Wärmepumpen-Systeme in Fließgewässern

Im Rahmen meiner Bachelor-Thesis an der Technischen Universität Darmstadt im Fachgebiet Wasserbau & Hydraulik besteht meine Aufgabe darin, eine systematische Erfassung aller Flusswasser-Wärmepumpen-Systeme in Deutschland anzufertigen. Aus diesem Grund möchte ich Behörden sowie Betreiber von Wärmepumpen-Systeme in Fließgewässern befragen, welche Erfahrungen sie mit diesen Anlagen gewinnen konnten. Die gesammelten Daten werden im Rahmen der Abschlussarbeit, sowie der Forschungsarbeit an der TU Darmstadt vertraulich behandelt.

Ich würde mich daher freuen, wenn Sie mich bei meiner Abschlussarbeit unterstützen und mir das Formular ausgefüllt an abel.lukas@gmx.de zurücksenden könnten. Ich freue mich über eine Rücksendung bis zum 15.05.2018.

Behörde:

- 1) Dauer der Genehmigung einer Wärmepumpenanlage in einem Fließgewässer?

- 2) Welche Probleme können bei der Genehmigung auftreten bzw. treten am häufigsten auf?

- 3) Welche Anlagen befinden sich in Ihrem Zuständigkeitsbereich (Betreiber, Standort etc.)?

4) Gibt es in Ihrem Zuständigkeitsbereich Anlagen, die nicht umgesetzt wurden? Wenn ja, woran ist die Umsetzung gescheitert?

5) Wie sind Ihre allgemeinen Erfahrungen zu Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern?

6) Dürfen die Daten publiziert werden?

☐ Ja ☐ Nein

Hier meine Daten:

Lukas Abel
Wilhelm-Leuschner-Straße 14
64347 Griesheim
abel.lukas@gmx.de

Betreuer im Rahmen der Bachelor-Thesis:

Steve Borchardt
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt
06151 16-21244
s.borchardt@wb.tu-darmstadt.de

Abbildung 9: Fragebogen an die zuständigen Behörden (eigene Darstellung)

Wärmepumpen-Systeme in Fließgewässern

Im Rahmen meiner Bachelor-Thesis an der Technischen Universität Darmstadt im Fachgebiet Wasserbau & Hydraulik besteht meine Aufgabe darin, eine systematische Erfassung aller Flusswasser-Wärmepumpen-Systeme in Deutschland anzufertigen. Aus diesem Grund möchte ich Behörden sowie Betreiber von Wärmepumpen-Systeme in Fließgewässern befragen, welche Erfahrungen sie mit diesen Anlagen gewinnen konnten. Die gesammelten Daten werden im Rahmen der Abschlussarbeit, sowie der Forschungsarbeit an der TU Darmstadt vertraulich behandelt.

Ich würde mich daher freuen, wenn Sie mich bei meiner Abschlussarbeit unterstützen und mir das Formular ausgefüllt an abel.lukas@gmx.de zurücksenden könnten.

Betreiber:

- 1) Können Sie mir die Funktionsweise Ihrer Anlage kurz erklären? (offenes oder geschlossenes System?)

Offenes System: Wasser wird aus dem Fließgewässer entnommen und zum Verdampfer geleitet

Geschlossenes System: Wärmetauscher ist in Fließgewässer installiert

- 2) Inbetriebnahme der Anlage? / Ist sie noch in Betrieb?

- 3) Probleme beim Genehmigungsprozess?

4) Welche besonderen Herausforderungen beinhaltet die Projektierung der Anlage?

5) Wie ist die Lage der Anlage und warum wurde sie dort installiert? (Welche Vorteile?)

6) Charakteristische Daten (soweit verfügbar):

Wärmepumpen Typ:

Betriebsweise

(monovalent/monoenergetisch/bivalent):

Falls bivalent: Welches Heizsystem?:

Art des Systems: (offen/geschlossen):

Heizwärmeleistung:

Wärmeenergie:

Leistungszahl:

Jahresarbeitszahl:

Deckungsgrad:

Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:

Entnahmemenge (falls offenes System):

Kältemittel:	
Name des Fließgewässers:	
Durchschn. Flusswassertemperatur (Winter):	
Fließgeschwindigkeit:	
Abkühlung:	
Abflussmenge:	

7) Welche Probleme sind aufgetreten? (Verschmutzungen an der Pumpe, Naturschutz etc.)

8) Was würden Sie bei einem Neubau der Anlage betrachten bzw. ändern?

9) Falls Anlage bereits zurückgebaut: Aus welchem Grund wurde die Anlage zurückgebaut?

10) Dürfen die Daten publiziert werden?

☐ Ja ☐ Nein

Abbildung 10: Fragebogen Betreiber (eigene Darstellung)

5. Aktive Anlagen in Deutschland

Lauterecken

Seit 2011 ist in der Stadt Lauterecken (Rheinland-Pfalz) eine Wärmepumpe installiert, die öffentliche Gebäude sowie einige Privathaushalte vor Ort mit Wärme versorgen soll. Dabei werden vor Ort der Lauter circa 10 Liter Flusswasser pro Sekunde entnommen, um anschließend mittels einer Wärmepumpe die Wärmeenergie für die öffentlichen Gebäude nutzbar zu machen. Um die Gewässerdynamik nicht wesentlich zu beeinträchtigen, wird das Wasser im Abstrom einer Wassermühle gefördert. Die Bauherren haben sich für eine thermeco₂ Wärmepumpe entschieden, die sich besonders durch hohe Vorlauftemperaturen auszeichnet. Mit dem Kältemittel Kohlendioxid ist zudem ein umweltfreundliches Trägermittel in den Prozess eingebunden. (Gerdes 2012, S. 1–3)

Im Laufe der Betriebszeit stellte sich allerdings heraus, dass die Anlage in Zeiten des höchsten Wärmebedarfs, nicht mit ausreichender Leistung arbeitet. Die Anlage war dementsprechend an deutlich weniger Wintertagen in Betrieb, als in der Projektierung vorgesehen. Aus welchem Grund die Anlage nicht wie geplant funktioniert, wird derzeit in einem Rechtsverfahren ermittelt. (Dahlmanns 2018 [E-Mail])

Tabelle 1: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Lauterecken (selbsterstellt, Daten: Dahlmanns 2018 [E-Mail])

Betriebsweise:	bivalent (Gaskessel)
Art des Systems:	offen
Heizwärmeleistung:	500 kW
Wärmeenergie:	950 MWh/a
Leistungszahl:	3,61
Jahresarbeitszahl:	3,52
Deckungsgrad:	77%
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	3117 m ²
Entnahmemenge:	0,0125 m ³ /s
Kältemittel:	Kohlendioxid
Name des Fließgewässers:	Lauter
Durchschn. Flusswassertemperatur:	10°C (Winter)
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	3 K
Durchschn. Abflussmenge:	2,2 m ³ /s

Cunewalde

In der sächsischen Gemeinde Cunewalde ist im Oktober 2007 der Umbau einer ehemaligen Wasserkraftanlage zu einem Wärmepumpen-System zu Ende gegangen. Der Turbinengraben zwischen Berg- & Talschacht (siehe Abbildung 11) wird dazu genutzt, um dort mittels eines Wärmetauschers die Wärme direkt dem Flusswasser zu entziehen. Dies geschieht durch ein WEA-System, mit Wärmetauscherplatten, die ursprünglich zur thermischen Nutzung von Abwässern genutzt wurden. Durch die anschließend installierte Wärmepumpe wird die gewonnene Heizenergie dem Gebäude verfügbar gemacht.

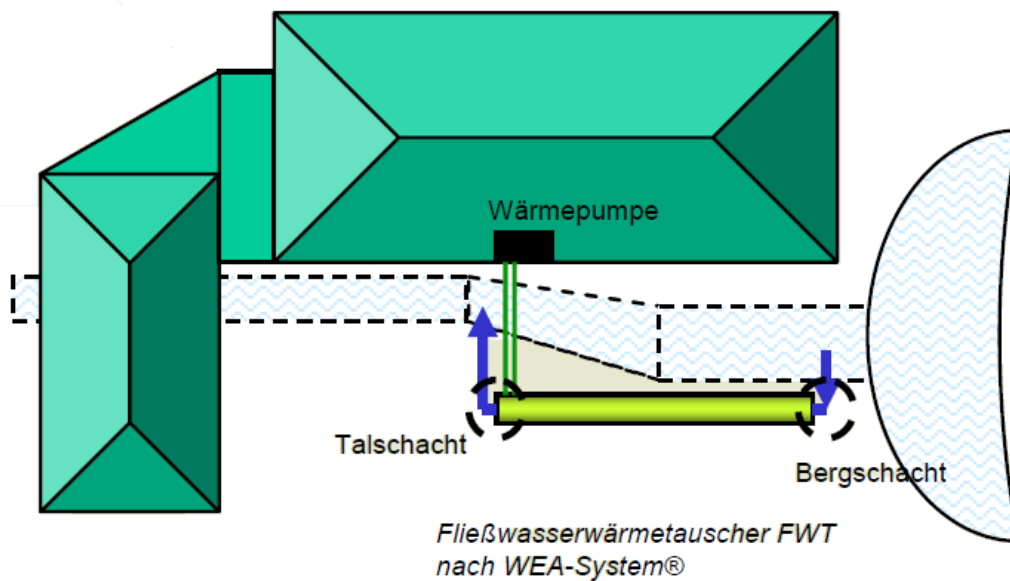


Abbildung 11: Einbau des unterirdischen Fließwasserwärmetauschers (Technologie- und Gründerzentrum Bautzen o. J., S. 1)

Das Wasser fließt aus dem Trutzmühlenteich in das Cunewalder Wasser, dabei überwindet das Fließwasser innerhalb des Turbinengrabens eine Höhe von 2,81m. Darin können dem Fließwasser durchschnittlich 3 K Wärme entzogen werden, was einer Heizwärmeleistung von 90 kW entspricht. Die Leistungszahl schwankt in Bezug auf die Fließwassertemperatur (2-14 °C), sowie der Heizungsvorlauftemperatur (35 – 55 °C) zwischen 3,2 – 4,5. Das System wird durch einen Gasheizkessel unterstützt, um das Gebäude auch zu Spitzenlastzeiten mit ausreichend Wärme versorgen zu können. Nach dreijährigem Betrieb fiel die Zwischenbilanz 2010 positiv aus. Der ergänzende Gasheizkessel musste nur an „einigen wenigen extremen Wintertagen“ (Bauplanung Bautzen 2010, S. 12–13) zugeschaltet werden.

Somit konnte der Fließwasserwärmetauscher in Cunewalde das Gebäude überwiegend eigenständig mit Wärme versorgen. (Technologie- und Gründerzentrum Bautzen o. J., S. 1–2)

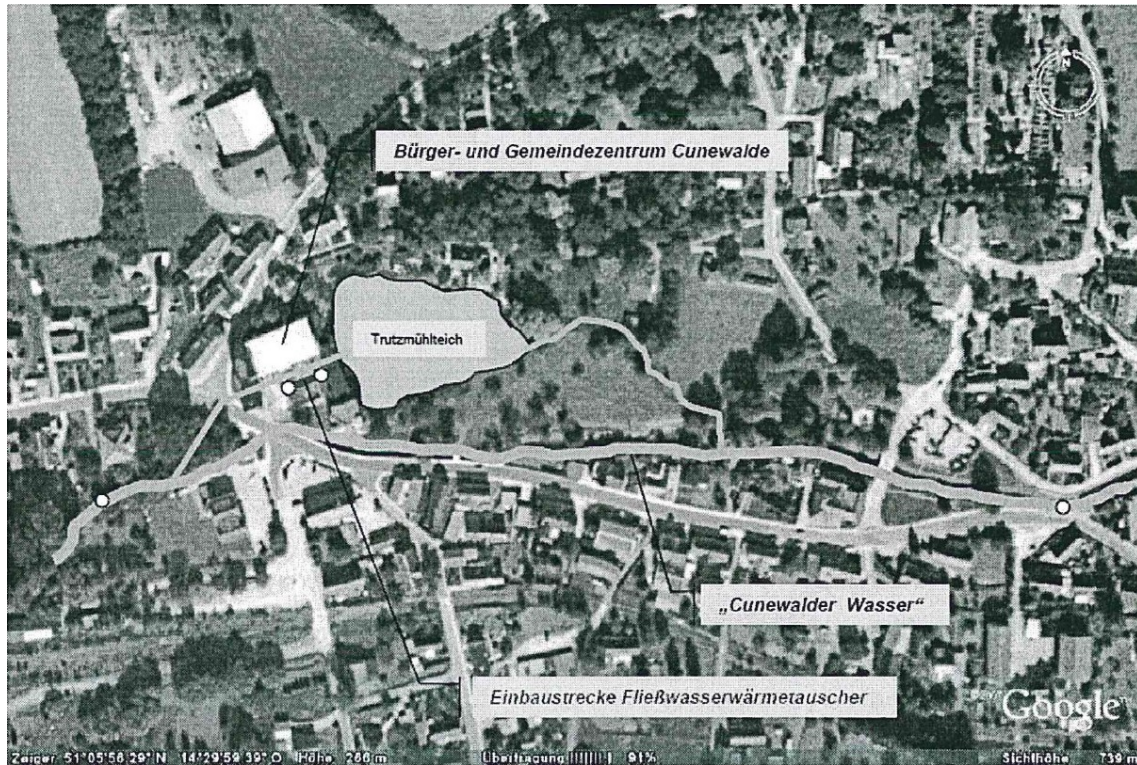


Abbildung 12: Lage der Wärmepumpe Cunewalde (Hainke 2018 [E-Mail])

Tabelle 2: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Cunewalde (selbsterstellt, Daten: Hainke 2018 [E-Mail])

Betriebsweise:	bivalent (Gaskessel)
Art des Systems:	geschlossen (Wärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	90 kW
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	3,2 – 4,5
Jahresarbeitszahl:	3,5
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	-
Entnahmemenge:	-
Kältemittel:	-
Name des Fließgewässers:	Teilstrom des Cunewalder Wassers
Durchschn. Flusswassertemperatur:	2 – 14 °C
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	3 K
Durchschn. Abflussmenge:	0,002 m ³ /s

Fürth

In der Stadthalle Fürth ist seit 1983 ein offenes Wärmepumpensystem installiert. Dabei wird die Flusswärme der nahegelegenen Rednitz genutzt, um das Veranstaltungsgebäude zu kühlen. Nach der Entnahme fließt das Flusswasser in ein Beruhigungsbecken, das dem Absetzen des Sandes dient. In der nächsten Kammer waren in der Anfangsphase drei Flusswasserförderpumpen installiert. Bei der Projektierung war ebenfalls eine Wärmezeugung innerhalb des Systems geplant. Da die Anlage aber nie zur Erzeugung von Wärme genutzt wurde, waren für den reinen Kühlbetrieb zwei Pumpen ausreichend. Dementsprechend wurde im Laufe der Zeit eine Flusswasserförderpumpe zurückgebaut (Schroers 2018 [E-Mail]). Aus welchem Grund der Wärmepumpenbetrieb in geplanter Weise nicht möglich war, ist nicht bekannt.

Bei einer Flusswassertemperatur von über 8 °C kann das System, bei maximaler Turboverdichterleistung, eine Kälteleistung von 800 kW erbringen. Wird die Turboverdichterleistung auf das Minimum von 30 % reduziert, werden bei gleicher Flusswassertemperatur, weiterhin 240 kW Kälteleistung erbracht. Die erzeugte Kälte kann dementsprechend über den installierten Wärmetauscher an die Klimaanlage abgegeben werden. Außerdem wurde das System so konzipiert, dass es bei sehr geringen Flusswassertemperaturen möglich ist, die Lüftungsanlagen direkt mit Flusswasser zu betreiben. (Schneider und Stöver 1983, S. 4–5) Eine Erneuerung der Anlage ist in den nächsten drei bis zehn Jahren geplant (Schroers 2018 [E-Mail]).

Tabelle 3: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Fürth (selbsterstellt, Daten: Schneider und Stöver 1983, S. 2–6)

Betriebsweise:	monoenergetisch
Art des Systems:	offen
Kälteleistung:	800 kW (über 8 °C Flusswassertemperatur)
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	2,6 - 3,4
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	-
Entnahmemenge:	0,048 m ³ /s
Kältemittel:	-
Name des Fließgewässers:	Rednitz
Durchschn. Flusswassertemperatur:	-
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	2,6 - 4 K
Durchschn. Abflussmenge:	3,89 m ³ /s

Friedberg

Seit 2016 ist in einer ehemaligen Mühle in Friedberg eine Wärmepumpe installiert. Das bestehende offene System wurde durch ein geschlossenes System ausgetauscht. Vorrangig durch den hohen Schwebstoffanteil der Wetter, der Schäden an der Hochdruckpumpe verursachte, war ein ökonomischer Betrieb nicht möglich. Aus diesem Grund entschied sich der Betreiber für die Installation eines Wärmetauschers direkt im Fließgewässer. Dabei wurden Wärmetauscherplatten mit einer Gesamtfläche von 10 m² an der Gewässersohle befestigt und durch einen Schutzkäfig vor äußeren Belastungen geschützt. Durch die Anordnung, der in Abbildung 13 dargestellten Wärmetauscherplatten wird die Strömung des Fließgewässers unmerklich beeinflusst. Die Wärme des Fließgewässers wird auf das Wärmeträgermedium, hier ein Wasser-Glykol Gemisch, übertragen und anschließend als Wärmeenergie für das angrenzende Gebäude genutzt. (Schemer 2018 [E-Mail])



Abbildung 13: Wärmetauscherplatten der Wärmepumpenanlage in Friedberg (Schemer 2018 [E-Mail])

Tabelle 4: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Friedberg (selbsterstellt, Daten: Schemer 2018 [E-Mail])

Betriebsweise:	-
Art des Systems:	geschlossen (Wärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	9 kW
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	-
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	270 m ²
Entnahmemenge:	-
Kältemittel:	-
Name des Fließgewässers:	Wetter
Durchschn. Flusswassertemperatur:	-
Fließgeschwindigkeit:	0,1 m/s
Durchschn. Abkühlung:	0,0022 K (Abkühlung des gesamten Flusses)
Durchschn. Abflussmenge:	0,96 m ³ /s

Walting

In einem Wasserkraftwerk in Walting wurde im Herbst 2015 ein bivalentes Wärmepumpensystem an der Altmühl in Betrieb genommen. Der Wärmetauscher wurde direkt im Bodenbereich der Turbinenvorkammer der Wasserkraftanlage installiert und konnte somit ohne Probleme durch die zuständige Behörde genehmigt werden (Schiebel 2018 [E-Mail]). Als besondere Herausforderung innerhalb der Projektierung der Anlage, stellte sich die Abstimmung mit dem bereits installierten Luftwärmetauscher zur Abwärmenutzung im Maschinenraum der WKA heraus. Da die Wärmeproduktion des Luftwärmetauschers essentiell abhängig von der Leistung der WKA ist, wurde das Wärmepumpensystem als konstante Wärmequelle für 300 m² Wohn-/Nutzungsfläche installiert. Die Anlage ist bivalent aufgebaut und wird an sehr kalten Wintertagen, an denen die Wärmepumpe nicht arbeiten kann, von einem Kachelofen ersetzt. Bisher sind bei der Anlage, außer einer Feinjustierung der Betriebsdrücke, keine Probleme aufgetreten. (Karg 2018 [E-Mail])



Abbildung 14: Lage der Mühle in Walting (Google Maps)

Tabelle 5: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Walting (selbsterstellt, Daten: Karg 2018 [E-Mail])

Betriebsweise:	bivalent (Kachelofen)
Art des Systems:	geschlossen (Wärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	40 kW
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	3-5
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	300 m ²
Entnahmemenge:	-
Kältemittel:	Tyfocor WGK1
Name des Fließgewässers:	Altmühl
Durchschn. Flusswassertemperatur:	5 °C (Winter)
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	-
Durchschn. Abflussmenge:	9,85 m ³ /s

Herrenhof (Gotha)

Eine private Wärmepumpenanlage ist seit 2009 in Herrenhof (Gotha) in einem Mühlen-graben in Betrieb. In Kombination mit einer Wasserkraftanlage wird für das angrenzende Wohnhaus Strom und Wärme produziert. Eine besondere Herausforderung bei der Projektierung der Anlage war primär das Fehlen von Erfahrungswerten. Der Betreiber hat sich dafür entschieden den Wärmetauscher in dem wasserumspülten Kiesbett des Fließgewässers zu installieren (Abbildung 15). Im Laufe des Betriebs treten in den Wintermonaten gehäuft Probleme auf. Der Betreiber geht davon aus, dass die Anlage verschlammmt und dementsprechend der Wirkungsgrad sinkt. Außerdem reicht die Leistung der Anlage bei langen Frostperioden, kälter als $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nicht mehr aus und muss zusätzlich unterstützt werden. Auch die Installation im Kiesbett bereitet Probleme, sodass Teile der Kunststoffrohre aufschwimmen. (Platz 2018 [E-Mail])



Abbildung 15: Verlegung der Kunststoffrohre, Wärmepumpe Herrenhof (Platz 2018 [E-Mail])

Tabelle 6: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Herrenhof (selbsterstellt, Daten: Platz 2018 [E-Mail])

Betriebsweise:	bivalent
Art des Systems:	geschlossen
Kälteleistung:	-
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	-
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	190 m ²
Entnahmemenge:	-
Kältemittel:	Glykol
Name des Fließgewässers:	Mühlgraben (Apfelstädt)
Durchschn. Flusswassertemperatur:	6° C
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	-
Durchschn. Abflussmenge:	0,3 m ³ /s

Aktuell gibt es in Deutschland noch einige weitere Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern. Allerdings konnten aufgrund von datenschutzrechtlichen oder sonstigen Gründen bei diesen Anlagen keine Daten erhoben werden. Folgende Auflistung soll als Übersicht der in der Recherche ermittelten Wärmepumpensysteme dienen:

- Bayreuth, Markgräfliches Opernhaus
- Ering, Inntalschwimmbad
- Frankenberg-Roddenau, Wasserkraftanlage
- Wetschaft, Kranzmühle (Wetter)
- 1 Anlage in Maisach
- 1 Anlage in Grafrath
- 1 Anlage in Eltmann
- 1 Anlage in Sendelbach (Rentweinsdorf)
- 1 Anlage in Mittelsachsen
- 1 Anlage im Rhein-Neckar-Kreis
- 1 Anlage in Kaiserslautern
- 5 Anlagen im Landkreis Esslingen
- 1 Anlage in Bad Aibling
- 1 Anlage in Bamberg

6. Zurückgebaute Anlagen in Deutschland

Esslingen

Ein Vorzeigeprojekt in Sachen Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern wurde 1976 in Esslingen in Betrieb genommen. Der naheliegende Neckar dient den circa 200 Wohneinheiten als Energiequelle für Raumheizung und Warmwasseraufbereitung. Dabei handelte es sich um die zu diesem Zeitpunkt größte Laufwasserwärmepumpenanlage Europas. Eine Besonderheit ist ein stromaufwärts gelegenes Wärmekraftwerk, welches durch seine Abwärme die Temperatur in diesem Flussabschnitt erhöht und damit gleichzeitig eine höhere Wärmeenergie für die anschließende Wärmepumpenanlage bietet. (Boullion 1977, S. 382)

Um ein Einfrieren der vier installierten Wärmepumpen an kalten Wintertagen zu verhindern, wurden diese mit einer Ölzentralheizungsanlage kombiniert. Das Flusswasser wird dem Neckar entnommen, in Wärmetauscherbecken gepumpt und anschließend mittels Plattenwärmetauschern zur Energiegewinnung genutzt. Dem Flusswasser wird dabei so viel Wärme entzogen, dass die Temperatur bei der Wiedereinleitung eine Differenz von 1 K beträgt. Die Gesamtwärmeleistung der vier Pumpenanlagen beträgt 765 kW. (Boullion 1977, S. 383)

Wärmepumpe 1 dient der Warmwasseraufbereitung, welche durch zwei Warmwasserspeicher ergänzt wird. Als Redundanz kann Wärmepumpe 2 die Tätigkeiten der Pumpe übernehmen. Die Ölkesselanlage ersetzt die Wärmepumpen zur Warmwasseraufbereitung wegen Vereisungsgefahr ab einer Flusswassertemperatur von weniger als 3-4°C. (Boullion 1977, S. 383)

Die Wärme für die Raumheizung wird durch die Wärmepumpen 2,3,4 bereitgestellt. Während Wärmepumpe 1 & 2 das Kältemittel Dichlordifluormethan, auch R12 genannt, nutzen, arbeiten die anderen beiden Pumpen mit Chlordifluormethan (R22). Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich insbesondere durch die unterschiedlichen Verflüssigungstemperaturen; 60°C bei R12, sowie 50°C bei R22. Sinken die Außentemperaturen unter -7°C und dementsprechend die Flusstemperatur unter 3°C übernimmt die Ölzentralheizungsanlage die komplette Wärmeversorgung. (Boullion 1977, S. 383)

Aufgrund von immer weiter sinkenden Wassertemperaturen des Neckars (siehe Abbildung 16) ist die Anlage allerdings immer ineffizienter geworden und deshalb Ende 2012

gegen ein mit Erdgas betriebenes Blockheizkraftwerk ausgetauscht worden (Försterling 2014, S. 1).

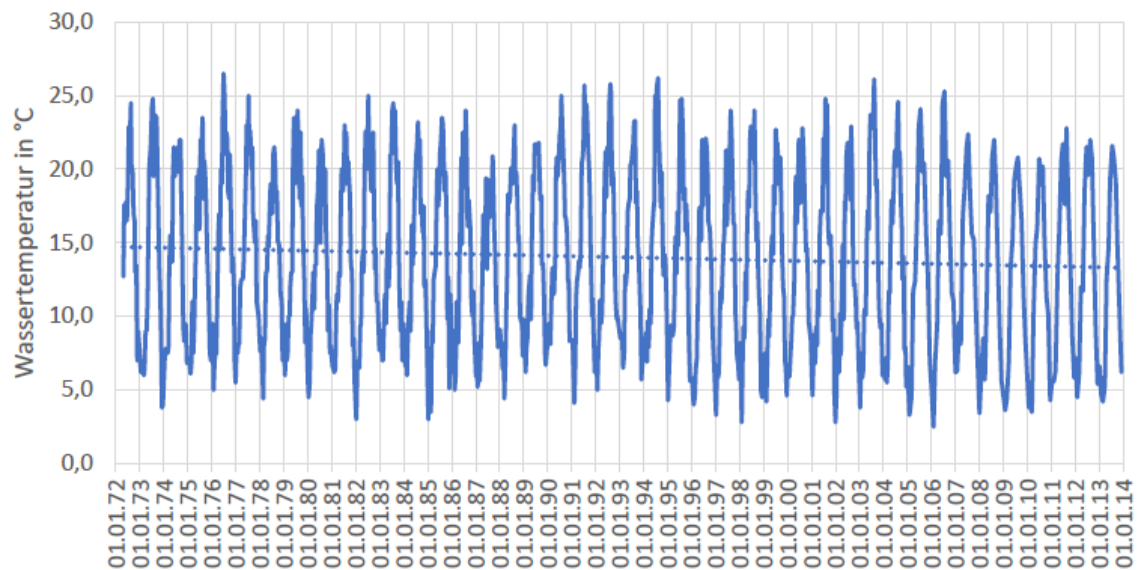


Abbildung 16: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Neckars bei Gundelsheim, Trendline 1972-2014, Temperaturabnahme mit $-0,33 \text{ K/Dekade}$ (Pflum 2017, S. 95)

Wie stark die Leistung einer Wärmepumpenanlage von der Flusswassertemperatur abhängt, wird in Abbildung 17 deutlich, die auf Wärmepumpe 3 Bezug nimmt. Einer sinkenden Flusstemperatur steht hier ebenfalls eine immer geringer werdende Leistungszahl gegenüber. Bei niedrigeren Flusswassertemperaturen arbeitet die Wärmepumpe dementsprechend ineffektiver.

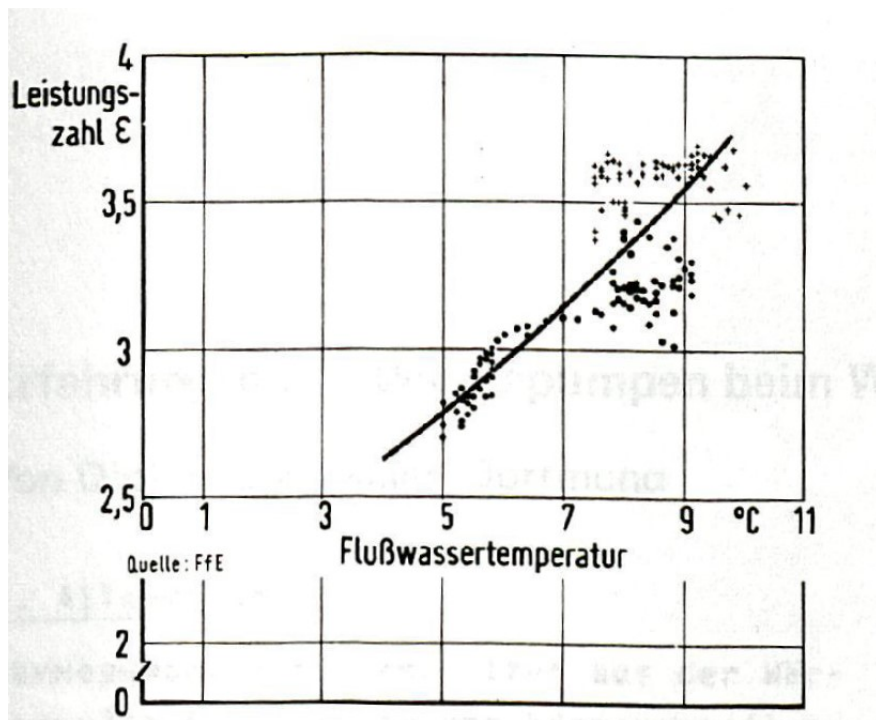


Abbildung 17: Leistungszahl der Wärmepumpe III in Abhängigkeit von der Flusswassertemperatur (Rumpf 1977, S.59)

Tabelle 7: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Esslingen (selbsterstellt, Daten: Boullion 1977, S. 382–384; Rumpf 1977, S. 62–65)

Betriebsweise:	bivalent (Ölkessel)
Art des Systems:	offen (Plattenwärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	765 kW
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	3,6 (Wärmebedarf durch WP III)
Jahresarbeitszahl:	3,2
Deckungsgrad:	67%
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	15400 m ² / 6250 m ²
Entnahmemenge:	-
Kältemittel:	R12 (WP I, WP II), R22 (WP III, WP IV)
Name des Fließgewässers:	Neckar
Flusswassertemperatur:	8 – 10 °C (Winter)
Fließgeschwindigkeit:	0,3 m/s
Durchschn. Abkühlung:	1 K
Durchschn. Abflussmenge:	135 m ³

Um dem Flusswasser die Wärme zu entziehen wird der Strom durch ein Verdampferbauwerk geleitet. Die dort installierten Wärmetauscher können dem Flusswasser bis zu 1 K Wärme entziehen. In drei Straßen sind die Plattenverdampfer mit einer Gesamtfläche von 2500m^2 so angeordnet, dass das Flusswasser die Platten gut umströmen und somit Wärme an diese abgeben kann (siehe Abbildung 19). Differenziert werden die Wärmepumpenkreisläufe durch zwei unterschiedliche Kühlmittel (R12 & R22). Das aufzuheizende 40°C warme Wasser wird im R 22 Kreislauf auf 325-327 K erwärmt, um anschließend im R 12-Kreis die Endtemperatur von 333 K zu erreichen. Dabei kann die Wärmepumpenanlage eine Gesamtwärmeleistung von 2400 kW erreichen. (Hamerak 1996, S. 49–50)



Abbildung 19: Verdampferbauwerk Mühlenviertel (St. Joseph-Stiftung Bamberg o. J., S. 9)

Der elektrisch betriebene Verdichter kann die elektrische Energie direkt aus dem Wasserkraftwerk nutzen. Obwohl eine Verdampfervereisung, durch die Abwärme des Kohlekraftwerks, ausgeschlossen werden kann, sind aufgrund von möglichen technischen Betriebsstörungen, zwei Elektrodenkessel (max. Leistung 800 kW) installiert worden. (Hamerak 1996, S. 50)

Die Wärme wird in zwei unterschiedlichen Varianten an die Haushalte weitergegeben. Zum einen wird durch einen Platten-Wärmetauscher die Wärme auf die herkömmlichen

Heizkreise übertragen und damit das Mühlenviertel direkt mit Wärme versorgt. Zum anderen wird die Wärme über eine ein Kilometer lange Fernwärmeleitung auf öffentliche Gebäude der Stadt (Universität, Wasserwirtschaftsamt, Vermessungsamt, Studentenwohnheim) übertragen. Dadurch deckt die Anlage fast 80% die Heiz- & Brauchwasserwärme der genannten Wohnhäuser bzw. öffentlichen Gebäuden. (Hamerak 1996, S. 53)

Im Laufe der Zeit griff das Flusswasser den Edelstahl des Wärmetauschers erheblich an. Da ein Ersatz des Wärmetauschers wirtschaftlich nicht rentabel gewesen wäre, wird die Wärme seitdem durch ein Fernwärmenetz bezogen. (Meyer 2018b [E-Mail])

Tabelle 8: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Bamberg (selbsterstellt, Daten: Hamerak 1996, S. 44–53)

Betriebsweise:	monoenergetisch
Art des Systems:	offen (Plattenwärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	2400 kW
Wärmeenergie:	4530 MWh/a
Leistungszahl:	-
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	80%
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	-
Entnahmemenge:	2,5 m ³ /s
Kältemittel:	R12, R22
Name des Fließgewässers:	Regnitz
Flusswassertemperatur:	-
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	<1 K
Durchschn. Abflussmenge:	54 m ³ /s

Erft / Bergheim-Zieverich

Ein Pilotprojekt wurde zwischen 1974-75 in einem Nebenfluss des Rheins, der Erft durchgeführt. Im Normalfall führt die Erft eine Wassermenge von 3-5 m³/s. Durch Einleitungen von Sumpfwasser, die aus Braunkohlegruben abgepumpt wurden, erhöht sich die Wassermenge um circa 20 m³/s. Aufgrund der, im Vergleich zum Flusswasser der Erft, hohen Temperaturen der Sumpfwässer, sollten Untersuchungen Aufschluss darüber geben, ob eine Wärmepumpenanlage in diesem Bereich wirtschaftlich ist. Verschiedene Untersuchungen über einen 30 Kilometer langen Abschnitt entlang der Erft ergaben, dass mit einer potentiellen Wärmepumpenanlage ($\epsilon = 3,5$) eine Heizleistung von 1400 MW zu erreichen wären. Dabei wird dem Fließwasser Wärme von circa 8 K entzogen. Abbildung 20 zeigt, dass die Wassertemperatur trotz des hohen Wärmeentzug und selbst bei niedrigen Außentemperaturen, deutlich im positiven Bereich liegt. Der Abschnitt zwischen Grevenbroich und Neuss soll gemäß Frühling und Klein (1975, S. 268) die genannte Heizleistung von 1400 MW langfristig über einen Zeitraum über 30 Jahre liefern. (Frühling und Klein 1975, S. 267–268)

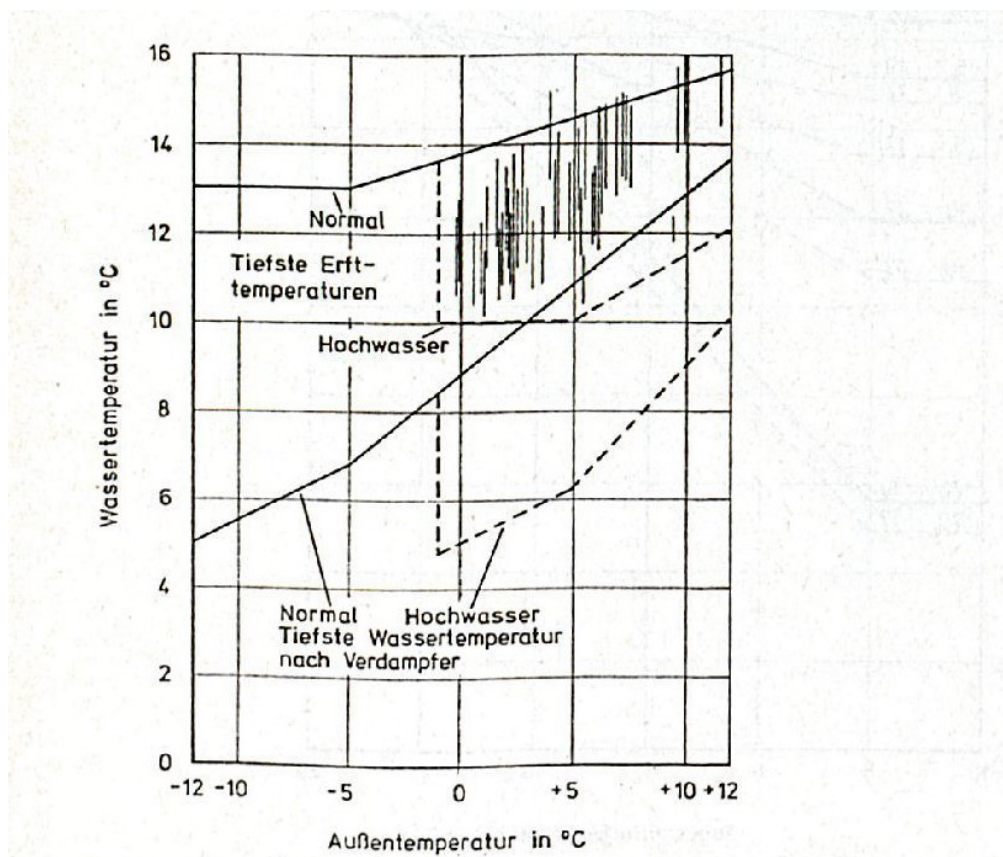


Abbildung 20: Erfttemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur bei Normal- und Hochwasser (Frühling und Klein 1975, S. 268)

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde 1981/82 in Bergheim-Zieverich eine Wärmepumpe in Betrieb genommen. Durch die eingeleiteten Sumpfwässer fiel die Temperatur niemals unter 10°C. Doch die Sumpfwässer stellten die Wärmepumpe auch vor Probleme. Denn die darin enthaltenen Schwebeteilchen verschlammten den Kondensator und minderten die Leistung der Wärmepumpe erheblich. Eine Filterung des Wassers war aufgrund rechtlicher Vorgaben nicht möglich. Da bei einem offenen System das Wasser in der gleichen Beschaffenheit in den Fluss zurückgeleitet werden muss. Zur Lösung dieses Problems wurden dem System Reinigungskörper (Schwammgummikugeln) zugeführt, um somit ein Verschlammen der Kühlrohre zu verhindern. Des Weiteren wurde ein Filter vor dem Wärmetauscher installiert, der das Wasser grob filterte und das Material über einen Bypass in die Erft zurückleitete. Vorrangig diente die Anlage hier der Grundlastdeckung und wurde mit einem ergänzenden Ölkessel kombiniert. (Krammer 1982, S. 740–741)

Heutzutage wäre eine solche Anlage in der Erft nicht mehr realisierbar. Um die Wasser-rahmenrichtlinie einhalten zu können, sind weitreichende Änderungen erforderlich. Neben der maximalen Aufwärmspanne der Gewässer von 3°C (Fischgewässerverordnung), wäre auch ein Erreichen des guten ökologischen Gewässerzustandes (WRRL) nicht einzuhalten. Aus diesem Grund werden Sumpfungswässer bereits seit einigen Jahren entweder in den Rhein geleitet oder direkt als Wärmequelle genutzt und somit abgekühlt.

Tabelle 9: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Bergheim-Zieverich (selbsterstellt, Daten: Krammer 1982, S. 740–742)

Betriebsweise:	bivalent (Ölkessel)
Art des Systems:	offen
Heizwärmeleistung:	-
Wärmeenergie:	-
Leistungszahl:	-
Jahresarbeitszahl:	-
Deckungsgrad:	-
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	-
Entnahmemenge:	0,028 m ³ /s
Kältemittel:	-
Name des Fließgewässers:	Erft
Flusswassertemperatur:	13-16°C (Winter)
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	-
Durchschn. Abflussmenge:	25-30 m ³ /s

Wesseling

Im Rahmen einer baulichen Sanierung eines Gebäudekomplexes wurde in der Stadt Wesseling 1980 eine Laufwasser-Wärmepumpe installiert. Im bivalenten Betrieb, unterstützt durch einen Ölheizkessel, diente die Wärmeenergie des Rheins der Versorgung von 5000 m² Wohn- & Nutzfläche. (Broschk et al. 1983, S. 951)

Der Betreiber RWE entschied sich für ein offenes System, in dem durch einen Plattenwärmetauscher dem Rheinwasser die nötige Wärme entzogen wird. Das Flusswasser wurde durch zwei Brunnenschächte, die in die Uferböschung integriert wurden, entnommen bzw. wiedereingeleitet und anschließend dem Verdampfer zugeführt. Vergleichbar mit der Anlage in Bergheim-Zieverich kamen in dieser Anlage ebenfalls Schwammgummikugeln zum Einsatz. Die parallel geschaltete Kesselanlage unterstützt die Wärmepumpe ab einer Außentemperatur von weniger als 5°C. Außerdem kann der Ölheizkessel den gesamten Wärmebedarf bei Störfällen der Wärmepumpe, sowie bei zu geringeren Rheinwassertemperaturen, selbstständig liefern. (Broschk et al. 1983, S. 951–952)

Eine Auflage der zuständigen Behörden war unter anderem eine Begrenzung der Abkühlspanne auf 6 K, sowie des abgekühlten Rheinwassers auf minimal 4°C. Da die Wassertemperatur des Rheines in den Wintermonaten bereits regelmäßig unter die geforderten 4°C fällt, konnte die Wärmepumpe nicht effektiv genug arbeiten. Aus diesem Grund wurden nach Broschk et al. (1983, S. 955), nicht näher definierte, “grundlegende Änderungen” getroffen, die es möglich machten, die Anlage bis 5°C mit voller Leistung zu betreiben. Dadurch konnte im Zeitraum von Juni 1982 bis Mai 1983 ein Heizanteilsanteil der Wärmepumpe von 85 % erreicht werden, siehe Tabelle 10. (Broschk et al. 1983, S. 953–955)

Tabelle 10: Monatliche Wärmelieferung, Stromverbrauch der Wärmepumpen-Heizzentrale im Zeitraum Juni 1982 bis Mai 1983 (verändert nach: Broschk et al. 1983, S. 959)

	Wärmelieferung (MWh)		Stromverbrauch (MWh)				
	gesamt	WP-Anteil	Wärmepumpe	Rheinwasserpumpe	Umwälzpumpen und Regelung	Heizölverbrauch (l)	Heizarbeitsanteil WP (%)
Juni (1982)	5,1	5,0	1,27	0,60	0,91	22	98
Juli	1,2	1,0	0,22	0,05	0,83	28	83
August	0	0	0,08	0	1,03	0	100
September	1,0	0,5	0,4	0,11	0,33	97	50
Oktober	78,9	78,1	22,14	7,09	2,08	139	99
November	119,2	114,6	36,71	8,20	2,29	831	96
Dezember	181,1	147,2	61,57	7,79	2,35	4837	81
Januar (1983)	135,1	121,1	48,66	6,46	1,90	2337	90
Februar	162,9	66,6	25,05	4,27	1,28	12839	41
März	148,6	145,9	53,48	8,06	2,28	479	98
April	94,6	94,5	35,72	6,66	1,99	18	100
Mai	72,8	72,7	26,65	6,44	2,03	18	100
Summe	1000,5	847,2	311,59	55,73	19,3	21663	85

Die starke Abhängigkeit der Wärmepumpeneffizienz von der Fließwassertemperatur lässt sich dadurch deutlich machen, dass eine geringere Rheinwassertemperatur auch eine niedrige Arbeitszahl der Wärmepumpe zur Folge hat, siehe Abbildung 21. Besonders auffällig ist, dass die Arbeitszahl bei Wassertemperaturen von 8 – 15°C noch relativ konstant bleibt, anschließend aber steil absinkt. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die Wärmepumpe nicht mehr die erforderliche Vorlauftemperatur erreicht. Deshalb unterstützt der Ölheizkessel die Wärmepumpe ab einer Außentemperatur von circa 6°C und liefert ab 3°C (ca. 4°C Wassertemperatur) die gesamte Wärmeenergie für die Heizzentrale. (Broschk et al. 1983, S. 955)

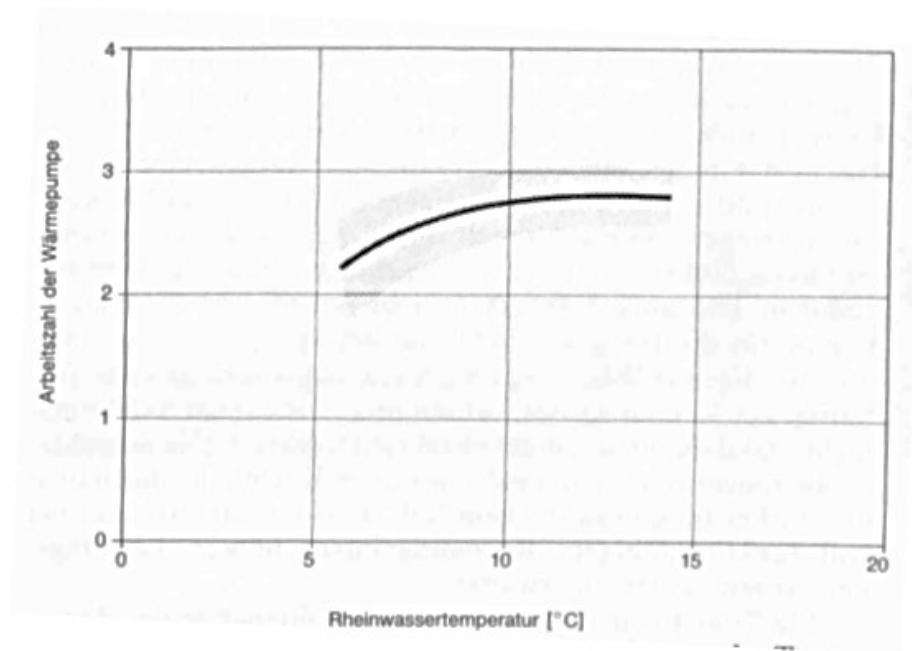


Abbildung 21: Arbeitszahl der Wärmepumpe (Wesseling) in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle (Broschk et al. 1983, S. 955)

Tabelle 11: Übersicht der relevanten Daten der Wärmepumpen-Anlage in Wesseling (selbsterstellt, Daten: Broschk et al. 1983, S. 954–957)

Betriebsweise:	bivalent (Ölkessel)
Art des Systems:	offen (Plattenwärmetauscher)
Heizwärmeleistung:	250 kW
Wärmeenergie:	ca. 1000 MWh/a
Leistungszahl:	-
Jahresarbeitszahl:	2,72 (1982/83)
Deckungsgrad:	55 % (1981/82)
Beheizte Wohn-/Nutzungsfläche:	5000 m ²
Entnahmemenge:	0,02 m ³ /s
Kältemittel:	R12
Name des Fließgewässers:	Rhein
Flusswassertemperatur:	8° C (Winter)
Fließgeschwindigkeit:	-
Durchschn. Abkühlung:	3 K
Durchschn. Abflussmenge:	2000 m ³ /s

Wärmepumpenanlagen in Fließgewässern

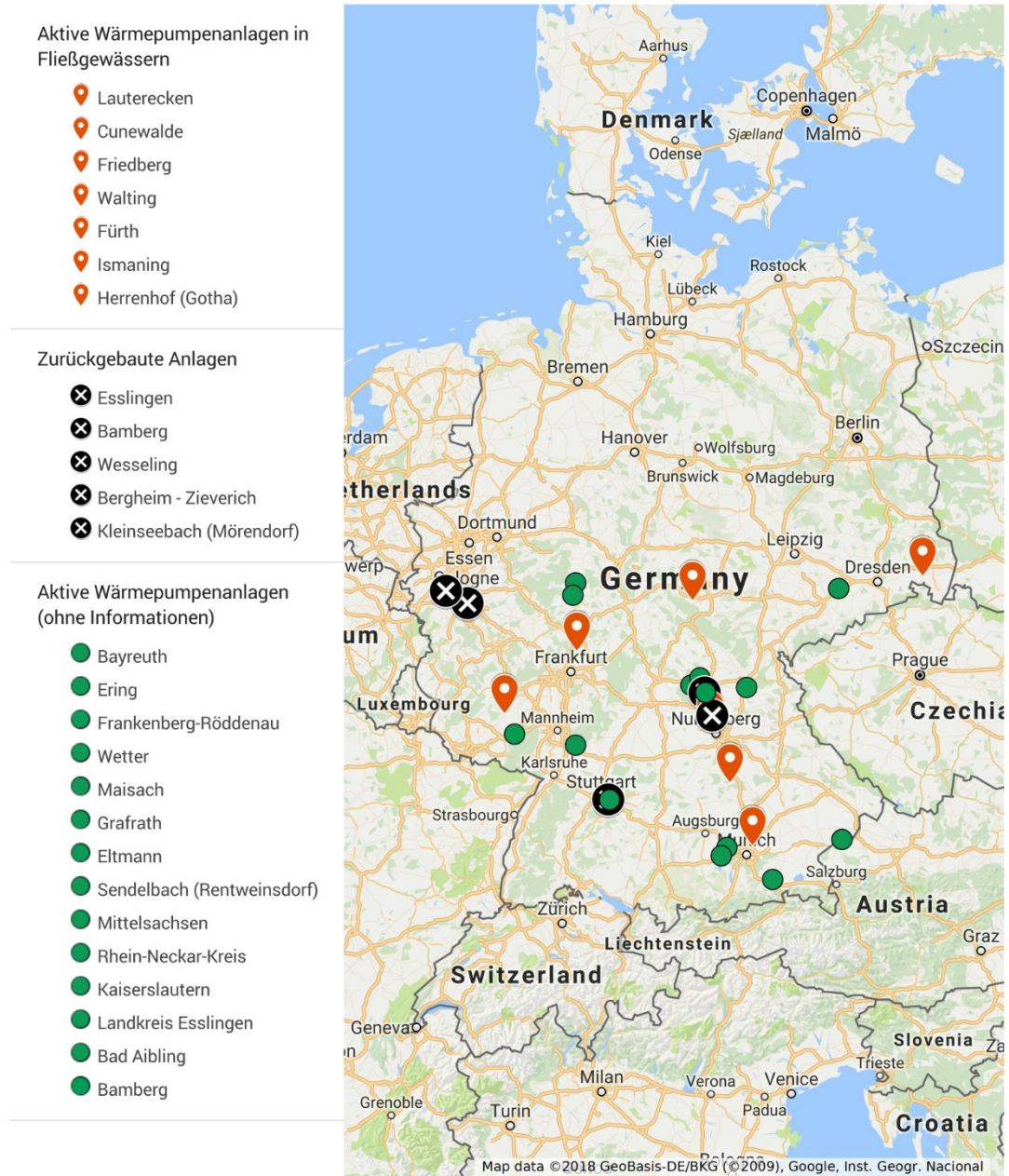


Abbildung 22: Wärmepumpenanlagen in Deutschland (Quelle: Google Maps)

Link zur interaktiven Karte: <https://bit.ly/2m05U5y>

7. Schwachstellen

Die Probleme, die bei dem Betrieb einer Wärmepumpenanlage auftreten können, sind breit gefächert. Durch den Wärmeentzug aus dem Fließgewässer ist bei den meisten Anlagen ein Betrieb bei sehr niedrigen Flusswassertemperaturen nicht möglich, weshalb häufig bivalente oder monoenergetische Systeme genutzt werden. Diese Systeme bedeuten Mehrkosten in der Anschaffung, außerdem muss die Regelung des unterstützenden Systems auf die Wärmepumpe angepasst sein. Dies bereitet beispielsweise in Lauterecken (Kapitel 5) erhebliche Probleme. Denn bereits bei sehr mäßigen Flusswassertemperaturen liefert die Wärmepumpe keine Wärmeenergie mehr.

Das Abschalten der Wärmepumpe bei niedrigen Flusswassertemperaturen ist in der Gefahr der Eisbildung begründet. Sinkt die Wassertemperatur des Fließgewässers bei Temperaturen um den Gefrierpunkt durch den Wärmeentzug der Wärmepumpe weiter, kann sich am Verdampfer (offenes System) oder Wärmetauscher (geschlossenes System) Eis bilden und somit die Anlage nachhaltig schädigen.

Besonders bei offenen Systemen kommt es bei der Wasserentnahme durch Pumpen, aufgrund von Schwebstoffen, Laub oder Treibgut häufig zu einer erheblichen Leistungsmin- derung der Anlage, wie sich bei dem Vorgängermodell der Anlage in Friedberg (Kapitel 5) erkennen lässt. Auch die Wärmetauscher im geschlossenen System, die nicht das Fluss- wasser direkt nutzen, müssen durch Metallkonstruktionen vor Treibgut und anderen ex- ternen Einflüssen geschützt werden. Doch auch das Flusswasser selbst kann der Anlage Probleme bereiten, wie das Beispiel in Bamberg (Kapitel 6) zeigt. Dort hat das aggressive Flusswasser den Edelstahl des Wärmetauschers angegriffen, sodass die Anlage zurückge- baut werden musste.

Je nach Größe des Fließgewässers kann der Einsatz von Wärmepumpensystemen Einfluss auf die Gewässerdynamik haben. Dabei ist darauf zu achten, dass bei dem Einsatz einer solchen Anlage die Strömung des Gewässers nicht wesentlich verändert wird, um den Wasserabfluss, sowie die Böschungs- und Sohlstabilität nicht zu gefährden. Falls es sich bei der Wärmequelle, um einen großen Fluss handelt, der mit Schiffen befahren wird, muss darauf geachtet werden, dass die Schifffahrt durch den Betrieb der Anlage nicht gestört wird. Die Nutzung eines offenen Systems ist bei kleineren Fließgewässern be- grenzt. Da aufgrund der Gewässerdynamik eine ausreichende Restwassermenge gegeben sein muss, darf dem Gewässer nicht zu viel Wasser entnommen werden.

Die Größe des Gewässers spielt ebenfalls bei der Betrachtung der entnommenen Wärme aus dem Fließgewässer eine entscheidende Rolle. Nach der WRRL darf sich der Zustand der Fließgewässer nicht verschlechtern. Dementsprechend sind in der OGewV (Kapitel 3.3) Grenzwerte für Temperaturänderungen festgelegt, um keinen Einfluss auf die Gewässerökologie zu nehmen. In der Regel ist die Temperaturänderung bezugnehmend auf den gesamten Fluss lediglich so gering, dass die Grenzwerte eingehalten werden. In Einzelfällen werden von den zuständigen Wasserbehörden Vorgaben zur Einhaltung einer maximal zulässigen Temperaturdifferenz gestellt.

Jede Anlage ist exklusiv auf die vorliegenden Umweltparameter eingestellt. Aufgrund der relativ stabilen Flusswassertemperatur im Jahresmittel kann die Wärmepumpe zuverlässig Wärme liefern. Sinkt die durchschnittliche Flusswassertemperatur aber langfristig, ist es möglich, dass die Anlage nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben ist. Dieses Problem wurde bei der Wärmepumpenanlage in Esslingen (Kapitel 6) festgestellt, weshalb die Anlage nach circa 35 Jahren außer Betrieb genommen wurde.

8. Potentiale

Kriterien für eine Nutzung von Wärmepumpen im Allgemeinen sind nach Baumann et al. (2007, S. 32) vorrangig die ausreichende Verfügbarkeit der Umweltwärme, eine hohe Wärmespeicherfähigkeit, sowie ein hohes Temperaturniveau. Außerdem muss sich die Wärmequelle schnell und ausreichend regenerieren.

In Deutschlands Fließgewässern ist ein hohes nutzbares Wärmepotential vorhanden (Pflum 2017, S. 47). Bei großen Flüssen übersteigt das Wärmeangebot sogar deutlich den Bedarf. Bei kleineren Flüssen sind die Schwankungen der Abflussmengen und Wassertemperaturen im Verlaufe des Jahres zu beachten. Als Unterstützung ist dort die Installation einer bivalenten Betriebsweise denkbar.

Im Zuge der Untersuchung sind diverse Standortgegebenheiten einer Wärmepumpenanlage im Fließgewässer mehrfach genannt worden, die einen positiven Einfluss auf die Genehmigung und den Betrieb der Anlage haben bzw. hatten. Einige der Anlagen (Cunewalde, Friedberg, Bamberg) wurden in alten Mühlengräben installiert. Da durch den Mühlengraben bereits ein erheblicher Einfluss auf die Gewässerdynamik genommen wurde, ist die Genehmigung an diesen Standorten leicht zu realisieren. Außerdem kann dort mittels Filter eine erleichterte Reinigung des Flusswassers erfolgen.

Neben der in Kapitel 7 dargestellten negativen Aspekte der Abkühlung eines Gewässers, kann eine Abkühlung der Wassertemperatur durchaus einen positiven Einfluss auf das Gewässer haben. In einigen Fällen, wie das Beispiel an der Erft (Kapitel 6) zeigt, ist die Reduzierung der Flusswassertemperatur ein durchaus erwünschter Nebeneffekt. Da die dort eingeleitete Sumpfungsässer einen großen Einfluss auf die Gewässerökologie genommen hat. Des Weiteren ist die Nutzung des Gewässers auch nach Kühlwassereintrag, ähnlich der Anlage in Bamberg (Kapitel 6), oder der Einleitung von Abwässern aus der Kläranlage sinnvoll.

Die Kopplung mit einer Wasserkraftanlage ist aufgrund mehrerer Gründe interessant. Die in Kapitel 2.2 dargestellten Kissenplattentaucher können der Abkühlung der Generatoren dienen. In der Anlage in Walting (Kapitel 5) wird die Flusswasserwärmepumpe zur Unterstützung der Luftwärmepumpe im Kraftwerk genutzt. Ein weiterer Vorteil von dieser Variante ist, ähnlich wie bei der Installation in einem Mühlengraben, dass die Wärmetauscher dort fest installiert und vor äußeren Einflüssen geschützt werden können.

Rumpf schrieb bereits 1977 in einem Bericht von den großen Potentialen an Wärme in Fließgewässern. Durch die Studie an der Erft (Kapitel 6) konnten diese Potentiale auch erstmals nachgewiesen werden. Für die Nutzung in der Breite nannte Rumpf zwei Voraussetzungen. Zum einen muss eine „systematische Erfassung der Fließgewässer mit den wesentlichen Daten, wie z.B. Temperaturgang, Wasserstände und deren Zeitgang, Art und Umfang der Verschmutzungen (...)“ (Rumpf 1977, S. 65) erfolgen. Zum anderen ist laut Rumpf die „Entwicklung eines Standardkonzeptes für Flusswasserwärmepumpen“ (Rumpf 1977, S. 65) zwingend erforderlich. Heutzutage sind die wesentlichen Parameter eines Fließgewässers erfasst. Allerdings konnte noch kein „Baukastensystem“ (Rumpf 1977, S. 65) für die Installation von Wärmepumpen in Fließgewässern entwickelt werden. Das liegt vor allem an der Individualität jeder einzelnen Anlage. Neben dem Unterschied zwischen den Parametern einer jeden Anlage, spielt auch der Ort der Installation eine große Rolle. Dabei ist beispielsweise der Einbau einer Wärmepumpenanlage in einem Mühlgraben deutlich von der Befestigung in der Fließgewässersohle zu unterscheiden.

Offene Systeme haben aufgrund der Verschmutzung der Pumpen oftmals nicht die erwünschte Leistung erzielt. Mit dem Einsatz von Wärmetauschern direkt im Gewässer wurde dieses Problem gelöst. Durch Metallgitter kann der Wärmetauscher in einem geschlossenen System vor äußeren Einflüssen geschützt werden.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass das geschlossene System einer Wärmepumpe in Fließgewässern eine umweltfreundliche Möglichkeit darstellt Wärmeenergie zu gewinnen. Dafür ist es erforderlich, dass die Anlage genau auf die örtlichen Gegebenheiten und Parameter angepasst ist, sodass die Anlage möglichst effizient arbeiten kann. Ein Baukastensystem für Wärmepumpenanlagen, wie von Rumpf gefordert, ist, aus den bereits genannten Gründen schwierig zu realisieren. Um solche Anlagen auch in Zukunft in der Breite nutzbar zu machen, ist das Baukastensystem allerdings unabdingbar. Alternativen zu dem geschlossenen System sind die in Kapitel 2.2 vorgestellten Kissenplatten-Wärmetauscher, sowie das WEA-System. Beide Varianten sind bisher allerdings nur selten zum Einsatz gekommen, weshalb dahingehend wenig Erfahrungswerte zu dokumentieren sind. Gleiches gilt für den Betrieb von Wärmepumpen durch Uferfiltration.

9. Literaturverzeichnis

- Baumann, Michael; Laue, Hans-Jürgen; Müller, Peter (2007): Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie ; Informationspaket. 4. Aufl. Berlin (BINE Informationsdienst).
- Bauplanung Bautzen, Bautzen (2010): Revitalisierung der Industriebrache "Alte Weberei" in Cunewalde. Sächsischer Staatspreis für Baukultur 2010.
- BMNT (2011): Umweltziele - der gute Zustand für unsere Gewässer. Hg. v. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus Österreich. Online verfügbar unter https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/plan_gewaesser_ngp/umsetzung_wasserrahmenrichtlinie/umweltziele.html, zuletzt geprüft am 24.04.2018.
- Boullion, Hans (1977): Laufwasser-Wärmepumpenanlage im "Sanierungsprojekt Schelztorstraße" in Esslingen/Neckar. In: *Wasserwirtschaft* (67), S. 382–385.
- Broschk, J.; Kreutzer, R.; Rumpf, H.G. (1983): Wärmepumpen-Heizzentrale in Wesseling mit Rheinwasser als Wärmequelle. In: *TAB Technik am Bau* (14), S. 951–959.
- Dahlmanns, Helmut (2018): AW: Unterstützung im Rahmen meiner Bachelor-Thesis TU Darmstadt, 09.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.
- Diadem (2017): Kissen - Platten - Wärmetauscher in Wasserkraftwerken. Online verfügbar unter <http://www.diadem-ag.ch/publikationen.htm>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2017, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Doelling, Robert (2016): Leistungszahl von Wärmepumpen. Energie Experten. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/leistung/leistungszahl.html>, zuletzt geprüft am 06.04.2018.
- Egli, Max (1944): Erfahrung aus dem Betrieb der Wärmepumpen-Heizung im Rathaus von Zürich. In: *Schweizerische Bauzeitung* 123/124, S. 87–91. Online verfügbar unter <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=sbz-002:1944:123:124::112>.
- Energie Experten (2018): Vorlauftemperatur der Wärmepumpe.
- Fachzentrum Wärme aus Abwasser (2009): Energiegewinnung aus Abwasser und Oberflächengewässern, 24.03.2009.
- Försterling, Sabine (2014): Strom direkt aus dem Keller - Mietwohnungen Esslingen, Wohnung mieten. Hg. v. Eßlinger Zeitung. Online verfügbar unter <https://www.bg->

es.de/kopie-von--esslinger-zeitung---strom-direkt-aus-em-keller, zuletzt geprüft am 21.03.2018.

Frühling, H.; Klein, E. (1975): Die Erft als Wärmequelle für die Raumheizung. In: *elektrowärme international* (33), S. 267–274.

Gerdes, Inge (2012): Wärmeenergie aus dem Flusswasser. Hg. v. KKA Kälte Klima Aktuell. Online verfügbar unter http://www.kka-online.info/artikel/kka_Waermeenergie_aus_dem_Flusswasser_1418893.html, zuletzt geprüft am 19.03.2018.

WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Fundstelle: 753-13.

Hainke, Madlen (2018): AW: Unterstützung im Rahmen meiner Bachelor-Thesis TU Darmstadt, 29.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Hamerak, Kurt (1996): Durch Wasserkraft betriebene Wärmepumpe beheizt Bamberger Mühlenviertel. In: *Wasserkraft & Energie*, S. 44–53.

HMUKLV (2015): Flussgebiete in Hessen: Oberflächengewässer. Hg. v. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter <http://flussgebiete.hessen.de/wasserrahmenrichtlinie/oberflaechengewasser/>, zuletzt geprüft am 24.04.2018.

Jacob, Martin (2018): Wärmepumpensysteme Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bingen, 17.04.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Karg, Markus (2018): Re: Unterstützung im Rahmen meiner Bachelor-Thesis TU Darmstadt (Betreiber), 16.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Krammer, Klaus (1982): Erft dient als kalte Fernwärme. In: *Sanitär- & Heizungstechnik* 1982, S. 740–742.

LAWA (1980): Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht.

Loidl, Max (o. J.): maxloidlverfahren. Online verfügbar unter <http://www.maxloidlverfahren.de/verfahren/>, zuletzt geprüft am 19.04.2018.

Meyer, Jens-Peter (2018a): Baugenehmigungen 2017: Wärmepumpe erobert Platz eins. Hg. v. Sonne Wind & Wärme. Online verfügbar unter <http://www.sonnewind-waerme.de/waermepumpe/baugenehmigungen-2017-waermepumpe-erobert-platz-eins>, zuletzt geprüft am 25.04.2018.

Meyer, Michaela (2018b): AW: Joseph-Stiftung - Kontaktformular: Rü. wg. Wärmepumpenanlage Obere Mühlen, 02.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Nguyen, Minh Duc (2014): Die Wärmepumpe - Funktion kurz und verständlich erklärt. Online verfügbar unter <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/die-waermepumpe-funktion-kurz-und-verstaendlich-erklaert/>, zuletzt geprüft am 06.04.17.

Paschotta, Rüdiger (2010a): Leistungszahl. Hg. v. RP-Energie-Lexikon. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/leistungszahl.html>.

Paschotta, Rüdiger (2010b): Wärmepumpe. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/waermepumpe.html>, zuletzt aktualisiert am 22.02.2017.

Pflum, Annika (2017): Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern. Bachelor-Thesis. TU Darmstadt, Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Platz, Matthias (2018): Re: Wärmepumpe, 06.07.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Rumpf, H.-G. (1977): Erfahrungen mit Wärmepumpen beim Wärmeentzug aus Fließgewässern. VDI-Berichte Nr. 282. In: *VDI-Berichte* (282), S. 59.

Rumpf, H.-G. (1980): Laufwasser-Wärmepumpen. Technik & Wirtschaftlichkeit. In: *elektrowärme international* (38), S. 229.

Schaerer, Thomas (2004): Die Hauptsätze der Thermodynamik. Hg. v. Elektronik Kompendium. Online verfügbar unter <https://www.elektronik-kompendium.de/public/schaerer/thermody.htm>, zuletzt geprüft am 07.06.2018.

Schemer, Rudolf (2018): WG: AW: Fragen bzgl. meiner Bachelorarbeit (Betreiber), 15.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Schiebel, Dionys (2018): AW: Unterstützung im Rahmen meiner Bachelor-Thesis TU Darmstadt (WWA Ingolstadt), 27.04.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Schneider, Rolf; Stöver, Bernd (1983): Wärme- und Kälteversorgung, Stadthalle Fürth. Kühlung und Heizung mit variablem Kälte-/Wärme-Austausch.

Scholt, Dieter (1981): Flußwärmetauscher für eine Wärmepumpenanlage. In: *DIE Kälte und Klimatechnik*, S. 178–182.

Schroers, Andreas (2018): Unterstützung im Rahmen Ihrer Bachelor-Thesis TU Darmstadt (Betreiber), 11.05.2018. E-Mail an Lukas Abel.

Spektrum Verlag (2001): Fließgewässer. Spektrum Verlag. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/fliessgewaesser/2519>, zuletzt geprüft am 25.04.2018.

St. Joseph-Stiftung Bamberg (o. J.): Sanierung des Mühlenviertels in Bamberg. Hg. v. Stadt Bamberg. Online verfügbar unter https://www.stadt.bamberg.de/media/custom/1829_508_1.PDF?1297691402, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Technologie- und Gründerzentrum Bautzen (o. J.): Modell- und Demonstrationsvorhaben "Wärmeentzug aus einem Teilstrom des Cunewalder Wassers" o. J., o. J.

Widmer, Peter (2014): Kissenplatten-Wärmetauscher in Wasserkraftwerken. In: *Wasserkraft & Energie*, S. 23–25.

Zogg, Martin (2010): Geschichte der Wärmepumpe 1834-1972. In: *HK-Gebäudetechnik*. Online verfügbar unter http://www.rebmann-heizungen.ch/news_presse/2010042001.pdf.